

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG MASALAH

Fenomena aliran fluida melalui suatu body merupakan fenomena yang sering kita temui dalam kehidupan. Seperti penggunaan pada jembatan, pesawat terbang, kapal laut, kendaraan darat dan konstruksi bangunan lainnya. Dalam aplikasinya tidak hanya satu macam bentuk body yang dilewati oleh aliran fluida, tapi terdapat banyak macam bentuk body yang direkayasa sehingga sesuai dengan fungsi yang diinginkan. Bentuk body yang berbeda akan menghasilkan karakteristik aliran fluida yang berbeda dan sangat berpengaruh terhadap fungsi dari bentuk body tersebut.

Aliran fluida yang melingkupi sebuah benda secara penuh akan menimbulkan tegangan pada benda tersebut, baik tegangan normal maupun tegangan geser. Tegangan normal disebabkan karena adanya tekanan dari fluida, sedangkan tegangan geser timbul akibat adanya viskositas fluida. Jika kita tinjau pada aliran dua dimensi, aliran yang mengalir secara horizontal akan menimbulkan gaya drag atau gaya hambat karena arah dari gaya ini berlawanan dengan arah aliran, sedangkan aliran yang mengalir secara vertikal menimbulkan gaya *lift* atau gaya angkat. Gaya *drag* sering dianggap mengganggu, tetapi dalam situasi tertentu gaya *drag* justru diharapkan. Aplikasi gaya *lift* dapat dilihat pada penggunaan pesawat terbang dan mobil balap. Pada pesawat terbang gaya *lift* yang diharapkan adalah gaya *lift* positif, artinya gaya angkat positif. Sedangkan pada aplikasi mobil balap, gaya *lift* yang diharapkan adalah gaya *lift* negatif agar mobil tetap melaju di atas tanah.

Untuk dapat mereduksi dan mengeliminasi implikasi-implikasi tersebut, maka diperlukan modifikasi geometri. Dengan memodifikasi atau mendesain ulang geometri diharapkan mampu menghasilkan gaya hambat (*drag*) yang semakin kecil sehingga penggunaan bahan bakar dapat diminimalisir. Banyak penelitian telah dilakukan untuk mendapatkan desain optimal. Namun, sampai saat ini para peneliti belum mampu menemukan solusi yang tepat untuk mendiagnosa dan mensintesa struktur aliran, sehingga dilakukan pengujian langsung melalui eksperimen. Untuk validasi hasil-hasil eksperimen, kajian *computational fluid dynamics* disertakan. Dengan model turbulen

dan propertis yang tepat, diharapkan studi CFD dapat memprediksi pola aliran dengan tepat sesuai hasil eksperimen.

Penelitian mengenai aliran fluida yang melewati berbagai bentuk body mobil telah banyak dilakukan. Manan Desai dkk [Ref. 1] melakukan penelitian tentang gaya aerodinamika mobil secara eksperimen dan numerik. Hasilnya nilai kritis *drag coefficient* (C_d) pada eksperimen 0.4 dan secara numerik 0.55. Damjanovic dkk [Ref. 2] melakukan simulasi karakteristik aerodinamika mobil. Hasilnya dengan perubahan desain akan menghasilkan aliran udara yang lebih bagus saat melintasi mobil sehingga mobil akan menjadi lebih stabil dan menambah traksi.

Siniša Krajnovi dan Lars Davidson [Ref. 3] melakukan pengujian secara numerik. Hasilnya ditemukan bahwa tingkat bilangan Reynolds tinggi memiliki pengaruh yang kecil terhadap hasil aliran yang terjadi disekitar mobil. Investigasi stabilitas laju kendaraan dari sudut pandang karakteristik aliran *steady* dan *unsteady*, seperti struktur *vortex* dan gerakanya di sekitar kendaraan dilakukan Takuji Nakashima dkk [Ref. 4]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pertimbangan dari karakteristik *unsteady aerodynamic* berdasarkan struktur aliran di sekitar kendaraan adalah penting untuk mengevaluasi stabilitas kendaraan serta evaluasi konvensional berdasarkan *steady aerodynamics*. Sheikh Ahmad Zaki [Ref. 5] melakukan pengujian aliran fluida dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D) untuk bentuk kendaraan Proton Iswara Aeroback dengan menggunakan FLUENT. Berdasarkan analisis yang dilakukanya, didapati bahwa nilai *drag coefficient* (C_D) dan *lift coefficient* (C_L) bagi model 2D untuk keadaan lantai statik masing-masing ialah 0.3794 dan -0.4797. Bagi keadaan lantai bergerak nilai C_D dan C_L masing-masing ialah 0.3776 dan -0.6187.

Sampai sekarang, fenomena separasi masih menjadi kajian peneliti. Banyak sudah dilakukan penelitian, namun kompleksnya struktur aliran menjadikan sulit memprediksi untuk berbagai kondisi aliran. Beberapa studi analitis-teoritis, eksperimen dan numerik dijadikan sebagai referensi dalam tugas akhir ini. Dengan keterbatasan penulis, maka tidak semua kajian referensi dasar penyusunan tugas akhir ini dapat ditulis dalam tugas akhir ini.

1.2. PERUMUSAN MASALAH

Karakteristik aerodinamis aliran suatu benda sangat dipengaruhi oleh kondisi streamline body. Body yang tidak streamline akan menghasilkan gaya drag yang sangat besar sehingga dapat mengurangi efisiensi kerja. Sedangkan body-body yang streamline maka menjadikan karakteristik aerodinamis yang lebih baik yaitu dengan berkurangnya nilai drag. Berangkat dari sini maka sudut kemiringan suatu body sangat mempengaruhi pola aliran pada bentuk suatu mobil. Diperkirakan dengan memodifikasi bentuk kemiringan kaca belakang mobil akan diperoleh karakteristik aerodinamis yang lebih baik. Untuk mengetahui seberapa besar dampak kemiringan kaca belakang suatu mobil terhadap kompleksitas aliran maka dilakukan suatu penelitian.

1.3. TUJUAN PENULISAN

Tujuan yang ingin dicapai adalah:

1. Menentukan nilai koefisien tahanan dari model kendaraan jenis sedan.
2. Mengetahui pengaruh kemiringan sudut kaca belakang mobil dengan koefisien tahanan kendaraan.

1.4. BATASAN MASALAH

Analisa numerik dalam tugas akhir menggunakan *software* FLUENT 6.3.26. sebagai validasi dari data yang diperoleh adalah dari literatur.

Sebagai batasan dalam pembahasan tugas akhir ini adalah:

1. Jenis mobil sedan yang dipilih sebagai model dasar geometri adalah BMW seri 320i produksi tahun 2010.
2. Simulasi dilakukan pada model BMW seri 320i tanpa roda, kaca spion dan *wiper*.
3. Simulasi dilakukan dengan variasi sudut kaca belakang mobil.
4. Simulasi dilakukan pada jenis aliran *steady*.

1.5. METODE PENYELESAIAN MASALAH

Pada tugas akhir ini untuk menghitung koefisien tahanan dari kendaraan jenis sedan menggunakan solusi numerik. Proses simulasi dengan menggunakan *software* FLUENT 6.3.26. Permodelan geometry dan input *meshing* dengan menggunakan Gambit 2.3.1.6. Model viskos (*viscous model*) yang digunakan adalah *k-SST*. Nilai koefisien tahanan yang diperoleh dibandingkan dengan koefisien tahanan dari pengujian pabrikan sendiri. Variasi dari sudut kaca belakang mobil juga menjadi pembanding terhadap nilai koefisien tahanan yang diperoleh.

1.6. SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika dalam penulisan tugas akhir ini nantinya akan terdiri dari enam bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Dalam laporan tugas akhir ini merupakan pendahuluan yang berisi tentang apa yang menjadi latar belakang dan tujuan penulisan tugas akhir ini. Dan memberikan secara tegas rumusan dan pembatasan permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini serta metodologi dalam penyelesaian masalah tersebut. Dan pada akhir bagian diberikan gambaran tentang sistematika penulisan laporan tugas akhir.

BAB II LANDASAN TEORI

Merupakan landasan teoritis yang digunakan dalam tugas akhir ini sebagai studi literatur, diantaranya yang berkaitan dengan persamaan-persamaan dasar yang berlaku dalam aliran fluida, misalnya persamaan kekekalan massa, persamaan kekekalan momentum, dan persamaan energi.

BAB III DASAR METODE KOMPUTASI DALAM FLUENT 6.2.16

Berisi tentang dasar metode numerik yang ada dalam FLUENT 6.2.16, diantaranya adalah metode diskritisasi dan variable-variabel yang disediakan oleh FLUENT.

BAB IV SIMULASI NUMERIK PADA FLUENT 6.3.26

Bagian yang menerangkan tentang proses komputasi dan simulasi numerik dalam FLUENT mulai dari penggenerasian *mesh* hingga proses iterasi dan penampilan data.

BAB V ANALISA HASIL SIMULASI

Disini menyajikan hasil simulasi yang telah dilakukan dan memuat tentang verifikasi dari data hasil simulasi dengan literatur yang digunakan.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Dalam bagian ini diberikan suatu kesimpulan dari hasil simulasi dan analisa yang telah dilakukan dimana pada akhirnya diharapkan dapat memberikan sumbangsih bagi dunia CFD khususnya penggunaan FLUENT dalam melakukan analisa aerodinamika kendaraan.

BAB II

LANDASAN TEORI

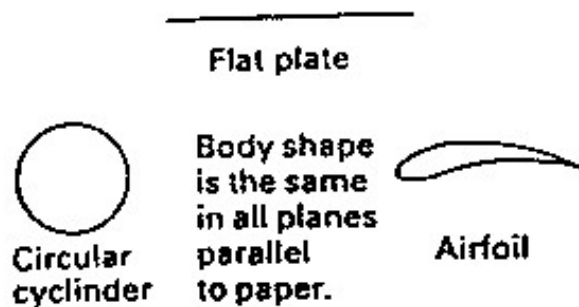
2.1 FENOMENA ALIRAN PADA STREAMLINED BODY

Suatu benda yang berada pada suatu fluida yang bergerak (atau benda yang bergerak dalam suatu fluida yang diam) akan mengalami gaya yang disebut dengan gaya-gaya aerodinamika. Oleh karena itu dalam bagian ini akan dijelaskan tentang pengaruh geometri benda terhadap gaya-gaya aerodinamika.

2.1.1 Geometri Benda

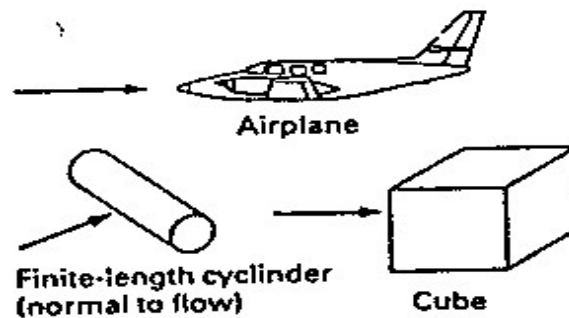
Geometri benda dapat dibagi dalam tiga kelompok utama, yaitu dua dimensi, tiga dimensi, dan *axisymmetric*.

Benda dua dimensi (Gambar 2.1) adalah benda yang memiliki bentuk sama pada seluruh bidang yang tegak lurus dengan sumbunya dimana sumbu benda memiliki panjang tak berhingga. Dengan kata lain bentuk benda sama pada seluruh bidang yang sejajar dengan kertas.



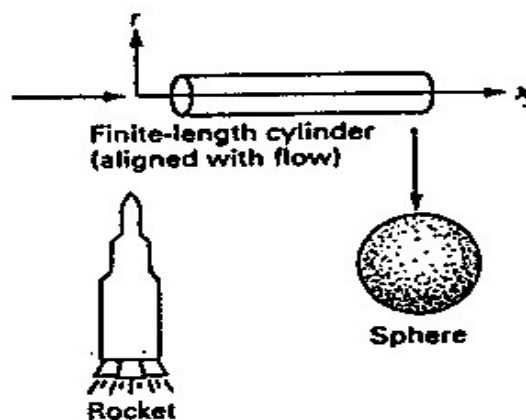
Gambar 2.1 Benda dua dimensi [Ref. 6, hal. 510]

Benda tiga dimensi (Gambar 2.2) memiliki panjang yang terbatas. Benda ini bisa memiliki bentuk yang sama dalam bidang tegak lurus dengan sumbu panjangnya, ataupun tidak.



Gambar 2.2 Benda tiga dimensi [Ref. 6, hal 510]

Benda *axisymmetric* (Gambar 2.3) adalah benda putar dengan bagian melintangnya berbentuk lingkaran. Benda ini memiliki bentuk yang sama pada seluruh bidang meridional (x, r).

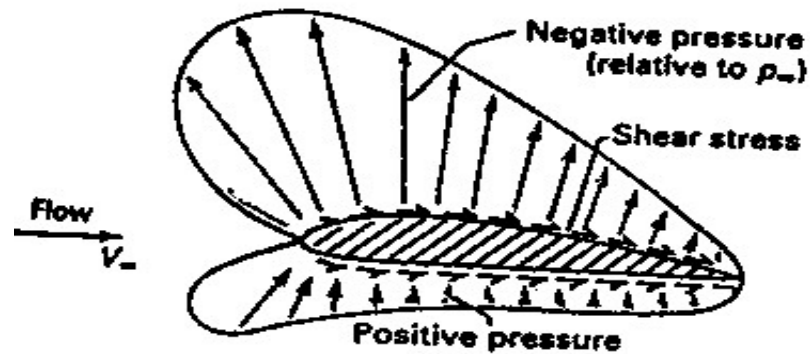


Gambar 2.3 Benda *axisymmetric* [Ref. 6, hal 510]

2.1.2. Perhitungan Gaya Tahanan (*Drag*) dan Gaya Angkat (*Lift*)

Tahanan dan gaya angkat adalah resultan gaya-gaya yang muncul akibat adanya tekanan dan tegangan geser pada permukaan benda. Gambar 2.4 mengilustrasikan distribusi tekanan dan tegangan geser untuk suatu airfoil, benda dua dimensi yang dirancang untuk mendapatkan gaya angkat tinggi dan tahanan yang rendah. Besarnya harga tekanan pada satu titik di permukaan airfoil tersebut diindikasikan dengan panjang satu anak panah yang tegak lurus terhadap permukaan. Sebagai catatan bahwa tekanan di atas airfoil tersebut negatif (lebih rendah dari tekanan aliran bebas) sedangkan tekanan di bagian bawah positif. Tegangan geser pada permukaan airfoil

diindikasikan dengan anak panah-anak panah yang sejajar dengan permukaan. Tegangan geser di semua titik searah dengan arah aliran dan kira-kira besarnya sama.



Gambar 2.4 Distribusi tekanan dan tegangan geser pada suatu *airfoil*

[Ref. 6, hal. 511]

Gaya netto pada airfoil dapat dihitung dengan mengintegrasikan tekanan dan tegangan geser di permukaan:

$$F = - \oint p \hat{n} dA + \oint \tau_w \hat{t} dA \quad (2.1)$$

dimana \hat{n} dan \hat{t} masing-masing adalah vektor-vektor satuan arah normal dan tangensial permukaan airfoil.

Tahanan dan gaya angkat adalah komponen-komponen gaya dalam arah aliran dan tegak lurus terhadap aliran. Dengan bantuan Gambar 2.5, diperoleh

$$D = \oint (-p \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dA \quad (2.2)$$

dan

$$L = \oint (-p \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dA \quad (2.3)$$

dimana :

F = gaya netto (N)

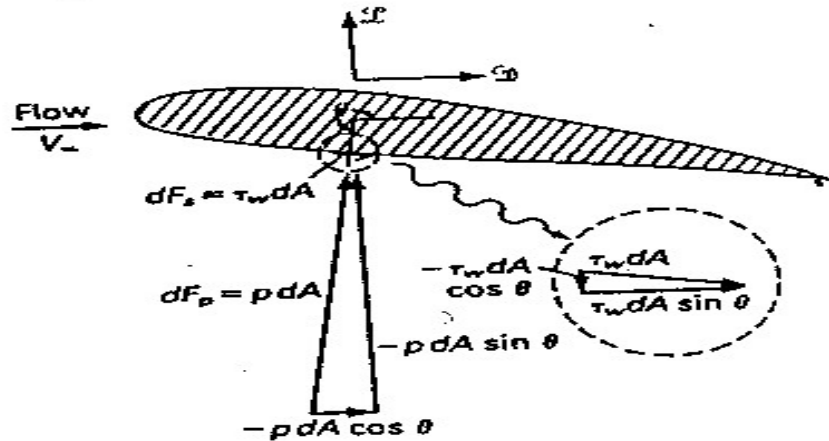
D = gaya hambat/ drag (N)

L = gaya angkat / lift (N)

p = tekanan (N/m^2)

τ_w = tegangan geser dinding airfoil (N/m^2)

A = luas (m^2)



Gambar 2.5 Geometri elemen gaya pada *airfoil* [Ref. 6, hal. 512]

Karena θ mendekati 90° hampir diseluruh permukaan atas airfoil dan mendekati 270° hampir diseluruh permukaan bawah airfoil, gaya angkat terutama dipengaruhi oleh tekanan sedang gaya tahanan terutama dipengaruhi oleh tegangan geser.

Persamaan 2.2 dan 2.3 digunakan hanya jika diketahui distribusi tekanan dan tahanan geser diketahui, hasil-hasil eksperimen biasanya diperoleh dan disajikan secara langsung dalam tahanan dan gaya angkat. Data-data tersebut biasanya disajikan dalam bentuk bilangan tak berdimensi yaitu berupa koefisien tahanan (*drag coefficient*) dan koefisien gaya angkat (*lift coefficient*), didefinisikan sebagai

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (2.4)$$

dan

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (2.5)$$

dimana :

C_D = koefisien gaya hambat (drag)

C_L = koefisien gaya angkat (lift)

D = gaya hambat/ drag (N)

L = gaya angkat/ lift (N)

ρ = densitas fluida (kg/m^3)

S = luasan acuan (m^2)

V_∞ = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)

[Ref. 7, hal. 515]

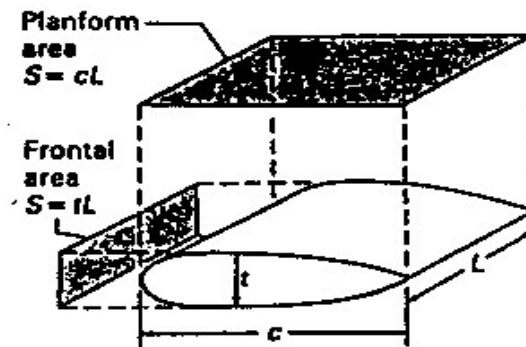
Berbagai definisi digunakan untuk luas, dua definisi yang paling umum digunakan adalah luas frontal (*frontal area*), yaitu luasan yang tampak jika kita memandang benda dari arah datang aliran, dan luas planform (*planform area*), yaitu luasan benda yang tampak dari atas (Gambar 2.4). Untuk benda dua dimensi, luasan didasarkan pada satuan lebar ($L=1$). Dari analisa dimensional koefisien tahanan dan koefisien gaya angkat untuk suatu bentuk benda dalam aliran *incompressible steady* adalah fungsi dari parameter tak berdimensi,

$$C_D = C_D(\alpha, Re) \quad (2.6)$$

dan

$$C_L = C_L(\alpha, Re) \quad (2.7)$$

dimana α dan Re masing-masing adalah sudut serang dan bilangan Reynolds [Ref. 2, hal. 516].



Gambar 2.6 Definisi luas planform dan luas frontal [Ref. 6, hal. 515]

2.1.3. Jenis Tahanan

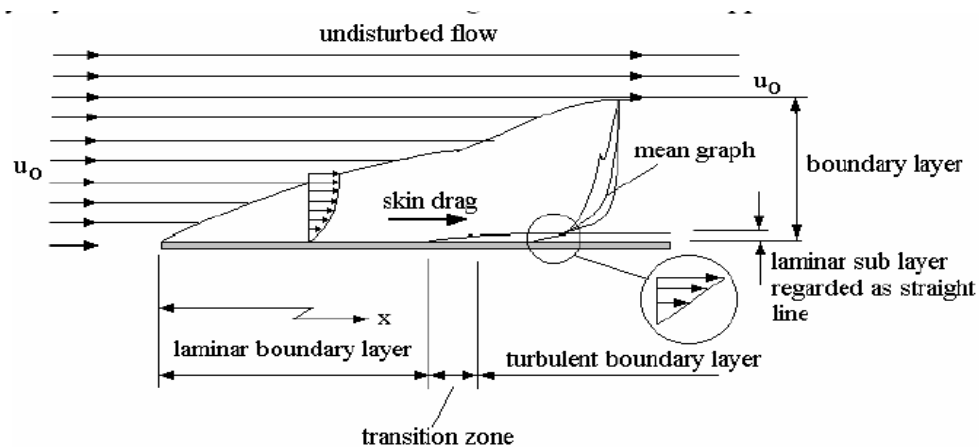
Tipe atau jenis tahanan ada dua, yaitu tahanan permukaan (*skin friction drag*) dan tahanan bentuk (*form drag*).

Tahanan permukaan timbul karena adanya tegangan geser yang terjadi di antara permukaan benda dengan lapisan fluida seperti terlihat pada gambar 2.7. Jika terjadi suatu aliran diatas permukaan yang searah dengan panjangnya dibandingkan dengan tingginya, maka benda tersebut disebut dengan *streamline*. Ketika suatu aliran mengalir di atas permukaan benda (*solid*) dan batas aliran menempel pada permukaan benda tersebut (permukaan benda menjadi basah atau *wet*) maka terjadi suatu kondisi yang disebut dengan *no slip condition*. Koefisien tahanan permukaan sendiri untuk *no slip condition* dapat dirumuskan,

$$C_{Df} = \frac{2D}{\rho u_0^2 \text{ wetted area}} = \frac{2\tau_w}{\rho u_0^2} \quad (2.8)$$

dimana :

- C_{Df} = koefisien tahanan permukaan
- D = gaya hambat/ drag (N)
- ρ = densitas fluida (kg/m^3)
- u_0 = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)
- wetted area* = permukaan benda basah (m^2)
- τ_w = tegangan geser (N/m^2)



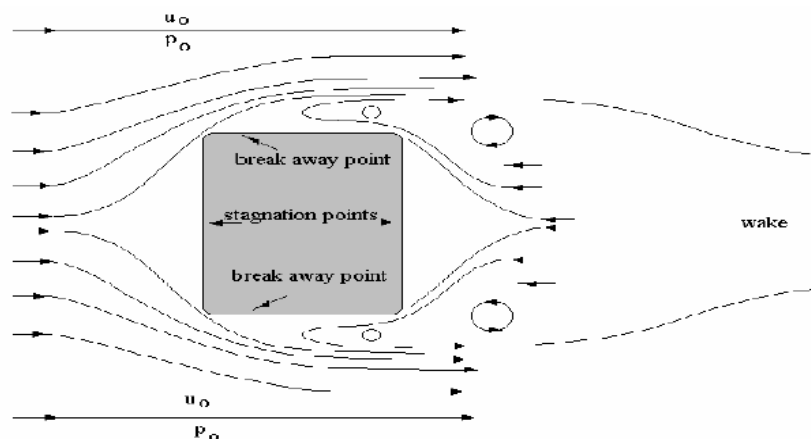
Gambar 2.7 Tahanan permukaan pada plat datar

Tahanan bentuk terjadi pada aliran fluida melewati benda yang memiliki tinggi lebih besar dibanding dengan panjangnya yang searah dengan arah aliran fluida seperti tampak pada gambar 2.8. Benda tersebut disebut dengan benda tumpul (*bluff bodies*). Tahanan bentuk terjadi karena perubahan tekanan. Koefisien tahanan bentuk dapat dirumuskan,

$$C_{Dp} = \frac{2D}{\rho u_0^2 \cdot \text{projected area}} = \frac{2(p-p_0)}{\rho u_0^2} \quad (2.9)$$

di mana :

- C_{Dp} = koefisien tahanan tekanan
- D = gaya hambat/ drag (N)
- ρ = densitas fluida (kg/m^3)
- p = tekanan (N/m^2)
- p_0 = tekanan acuan (N/m^2)
- u_0 = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)
- projected area = permukaan benda basah (m^2)



Gambar 2.8 Tahanan bentuk pada *bluff bodies*

2.1.4. Lapisan Batas

Pada tahun 1904, Prandtl memperkenalkan hipotesa lapisan batas, yang menjelaskan mengapa kedua tahanan bentuk dan tahanan friksi muncul dalam aliran bilangan Reynolds tinggi. Perhatikan aliran pada suatu benda tipis panjang, seperti pelat datar paralel atau airfoil pada gambar 2.9. Prandtl berpendapat bahwa bagaimanapun

kecilnya viskositas, fluida semestinya masih tetap memenuhi kondisi *no-slip* pada permukaan. Dengan demikian kecepatan fluida harus meningkat dari nol pada permukaan ke suatu nilai yang mendekati besarnya kecepatan aliran bebas pada jarak yang pendek diatas permukaan. Daerah dimana kecepatan meningkat dari nol ke harga aliran bebas ini disebut lapisan batas (*boundary layer*). Prandtl mencatat bahwa semakin tinggi bilangan Reynoldsnnya, lapisan batasnya semakin kecil, yang diperlihatkan dalam hubungan.

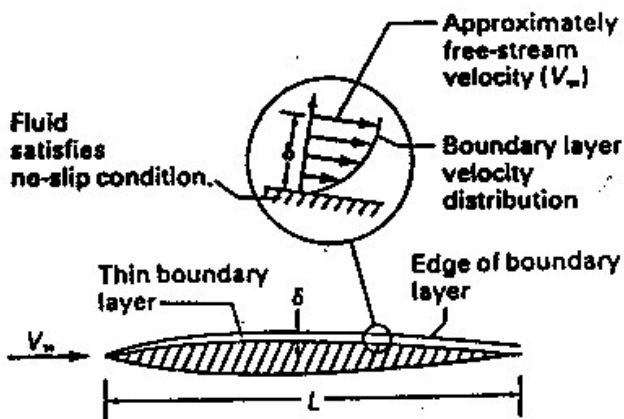
$$\frac{\delta}{L} \sim \sqrt{\frac{\nu}{V_{\infty} L}} = \frac{1}{\sqrt{Re}} \quad (2.10)$$

dimana :

- δ = tebal lapisan batas (m)
- L = panjang karakteristik (m)
- ν = viskositas kinematik fluida (m^2/s)
- V_{∞} = kecepatan fluida relatif terhadap obyek (m/s)
- Re = Reynolds number

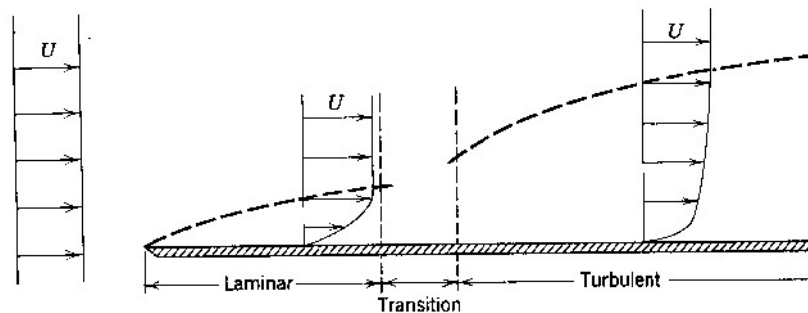
[Ref. 7, hal. 527]

Dalam hal ini tentu saja, semakin tipis lapisan batas, semakin besar nilai dari $\partial u / \partial y$ di dalam lapisan batas tersebut. Terdapat tegangan geser yang penting di dalam fluida lapisan batas, meskipun viskositasnya kecil.



Gambar 2.9 Lapisan batas viskos tipis pada suatu benda tipis dalam aliran dengan bilangan Reynolds tinggi [Ref. 6, hal. 527]

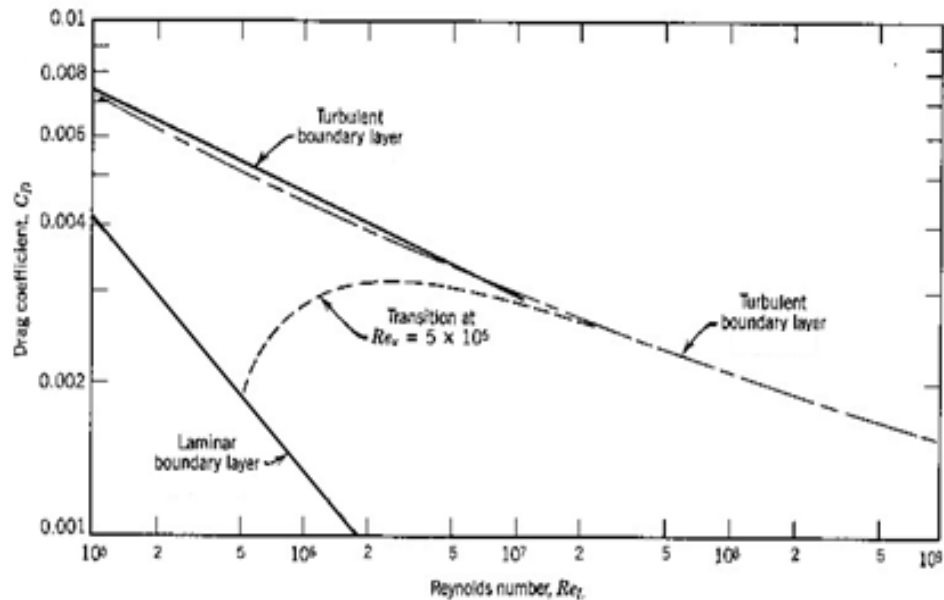
Selama lapisan batas tersebut tipis, keberadaannya memiliki efek kecil pada distribusi tekanan atau pola aliran dekat benda. Untuk pelat datar atau *airfoil* tipis, bentuk-bentuk garis arus (*streamline shapes*) pada dasarnya tidak berubah oleh adanya lapisan batas tersebut. Oleh karena lapisan batas adalah suatu daerah dimana fluida mengalami deformasi geser, alirannya bisa laminar atau turbulen bergantung pada nilai bilangan Reynoldsnnya. Aliran di dalam lapisan batas dekat ujung depan (*leading edge*) dari suatu pelat selalu laminar karena bilangan Reynoldsnnya (lokal) kecil; jika pelat tersebut cukup panjang, transisi ke turbulensi terjadi dan aliran tersebut turbulen pada daerah hilir dari pelat tersebut. Jika aliran diganggu oleh kekasaran atau turbulensi dalam aliran di luar lapisan batas, transisi terjadi lebih dekat lagi ke ujung depan (*leading edge*). Gambar 2.9 mengilustrasikan secara kualitatif pertumbuhan lapisan batas pada pelat datar tersebut. Dikarenakan oleh pencampuran yang meningkat dalam aliran turbulen, lapisan batas turbulen memiliki tegangan geser yang lebih besar daripada lapisan batas laminar. Seperti halnya, permukaan kasar mengalami tegangan yang lebih besar daripada permukaan halus [Ref. 6, hal. 528].



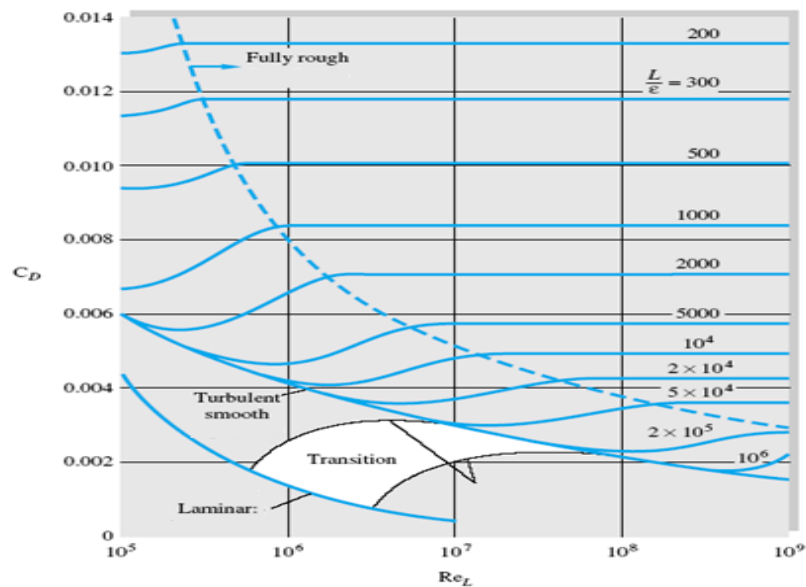
Gambar 2.10 Lapisan batas pada suatu pelat datar (ketebalan vertikal sangat diletakkan) [Ref. 7, hal. 390]

Fakta ini menerangkan perilaku koefisien tahanan untuk suatu pelat datar yang sejajar dengan aliran seperti diperlihatkan pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Pada bilangan Reynolds rendah, aliran dekat pelat adalah laminar dan koefisien tahanannya lebih kecil. Pada bilangan Reynolds tinggi, aliran dekat pelat adalah turbulen pada sebagian besar dari panjang pelat dan koefisien tahanannya lebih tinggi karena tegangan gesernya lebih besar. Transisi antara kurva laminar dan kurva turbulen bukanlah merupakan garis tunggal tetapi sekumpulan garis yang bergantung pada kekasaran pelat

dan tingkat turbulensi aliran fluida di atas pelat tersebut. Pada setiap harga bilangan Reynolds tertentu, pelat datar paralel halus memiliki koefisien drag yang paling kecil dari semua bentuk.



Gambar 2.11 Variasi koefisien tahanan terhadap bilangan Reynolds untuk suatu pelat datar halus dalam aliran [Ref. 7, hal. 418]



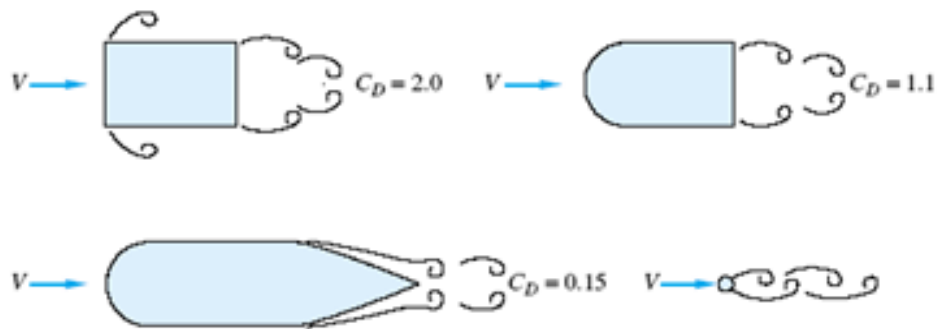
Gambar 2.12 Koefisien tahanan untuk pelat-pelat halus dan kasar [Ref. 8, hal. 443]

Terdapat dua prinsip penting yang harus diikuti dalam mendesain suatu benda dengan tahanan rendah:

- Apabila benda tersebut panjang dan tipis, seperti pelat datar paralel atau suatu *airfoil*, tahanannya berkaitan dengan friksi. Tahanan ini dapat dikurangi dengan menjaga alirannya laminar sebanyak mungkin. Hal ini mengisyaratkan permukaan-permukaan yang halus dan, jika benda tersebut memiliki ketebalan (seperti *airfoil*), pilih bentuk yang menunda transisi selama mungkin.
- Apabila benda tersebut adalah benda tumpul, tahanannya (pada bilangan Reynolds tinggi) berkaitan dengan tahanan bentuk. Tahanan ini dapat dikurangi dengan menunda separasi selama mungkin [Ref. 6, hal. 530].

Salah satu cara untuk mengurangi tahanan adalah dengan melakukan metode *streamlining*, yaitu memanjangkan bagian belakang benda. Hal ini berdasarkan pada lapisan batas, dengan memperlama terjadinya daerah separasi yang mana bergantung pada gradient tekanan dp/dx , dimana x adalah panjang permukaan [Ref. 6, hal. 530].

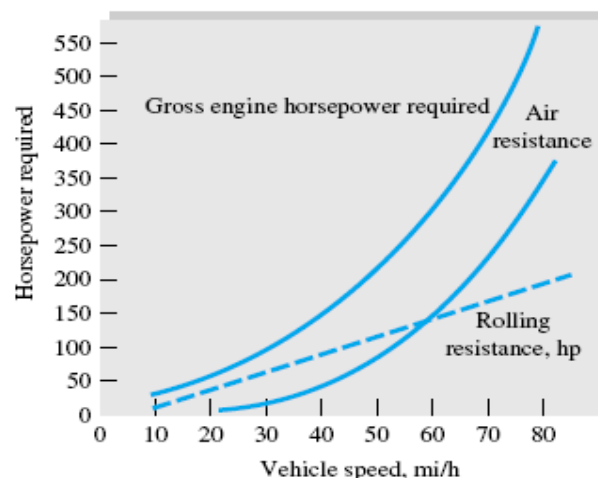
Terdapat suatu batas dari jumlah pengurangan tahanan yang dapat diperoleh dari *streamlining*. Seiring dengan semakin panjangnya benda, tahanan friksi meningkat karena terdapat lebih banyak permukaan “basah” seperti diperlihatkan pada Gambar 2.12. Tahanan benda yang minimum memberikan keseimbangan yang tepat antara tahanan friksi dan tahanan bentuk.



Gambar 2.13 Efek *streamlining* pada pengurangan tahanan benda dua dimensi, C_D didasarkan pada luas frontal [Ref. 8, hal.456]

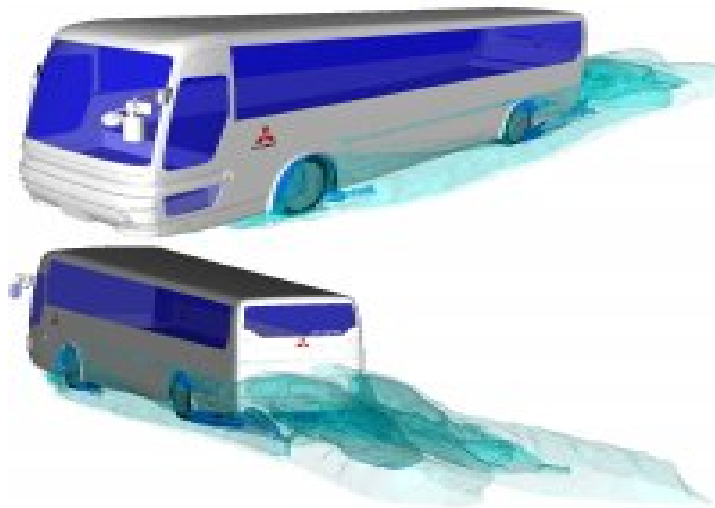
2.2 FENOMENA AERODINAMIKA MOBIL

Pertimbangan aerodinamika menjadi penting dalam desain kendaraan darat seperti truk dan mobil dikarenakan gaya aerodinamika memberikan beban tambahan pada mesin kendaraan, hal ini berasal dari gaya tahanan. Perhatikan suatu kendaraan melaju pada kecepatan konstan pada jalan datar. Kendaraan tersebut mengalami dua gaya yang menghambat gerak lajunya: perlawanan *rolling* (*rolling resistance*) dan tahanan aerodinamika. Perlawanan *rolling* berkaitan dengan deformasi menerus dari roda kendaraan. Penjumlahan antara tahanan aerodinamika dan perlawanan *rolling* disebut dengan beban jalan (*road load*). Mesin kendaraan harus secara terus-menerus menyediakan daya untuk mengatasi beban jalan tersebut. Daya tersebut merupakan hasil perkalian dari beban jalan dengan kecepatan kendaraan. Gambar 2.14 memperlihatkan variasi dari daya beban jalan terhadap kecepatan kendaraan untuk suatu kendaraan truk trailer (*traktor-trailer truck*). Daya perlawanan *rolling* hampir-hampir linier terhadap kecepatan, sedangkan daya tahanan aerodinamika bervariasi terhadap pangkat tiga kecepatan (koefisien tahanan mendekati konstan). Kurva perlawanan *rolling* dan kurva tahanan aerodinamika berpotongan (masing-masing berkontribusi sama pada beban jalan) pada suatu kecepatan antara sekitar 50 mph (80 km/h) dan 60 mph (96 km/h). Di atas kecepatan ini, daya yang dibutuhkan untuk mengatasi tahanan aerodinamika meningkat secara cepat dan menjadi faktor pengontrol dalam kecepatan kendaraan [Ref. 6, hal.552].



Gambar 2.14 Variasi daya beban jalan terhadap komponen kecepatan [Ref. 8, hal.462]

Pengurangan tahanan untuk mobil disulitkan dengan adanya permasalahan yang ditimbulkan akibat tahanan bawah (*underbody drag*) dan tahanan gangguan (*interference drag*). Bagian bawah kendaraan secara aerodinamika sangatlah rumit disebabkan oleh permukaan-permukaan yang menonjol seperti bagian-bagian penampung oli, *muffler* dan suspensi. Masing-masing permukaan ini mengalami gaya tahanan yang relatif besar. Gambar 2.15 memperlihatkan aliran udara yang ditimbulkan akibat tahanan bawah pada sebuah kendaraan jenis bus. Tahanan gangguan timbul akibat adanya penonjolan-penonjoloan dari permukaan kendaraan seperti kaca spion, pegangan pintu, dan rak tempat barang. Obyek-obyek ini tidak saja mengalami tahanan tetapi, hal yang sama pentingnya, mereka mengganggu aliran pada bentuk dasar benda, yang juga mempengaruhi tahanannya. Konsep tahanan gangguan mengacu pada kenyataan bahwa tahanan total yang berkaitan dengan penonjolan permukaan biasanya lebih besar dari penjumlahan tahanan benda dasar yang diisolasi dan penonjolan-penonjolan yang diisolasi [Ref. 6, hal.553].



Gambar 2.15 Aliran udara yang ditimbulkan akibat tahanan bawah (*underbody drag*) pada bus [Ref. 9]

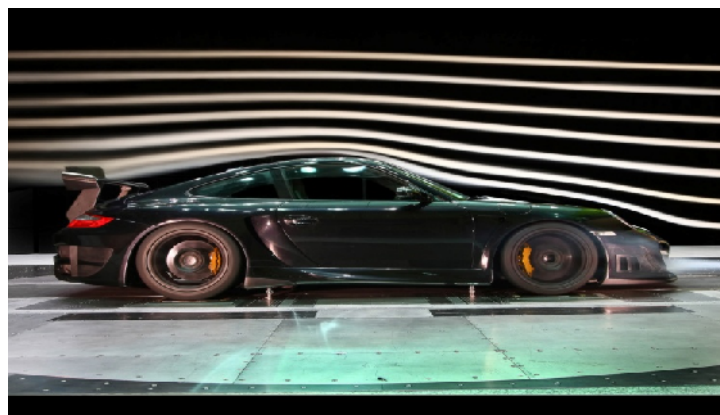
Berikut ini adalah beberapa contoh gambar pola garis arus (*streamline*) pada berbagai jenis mobil dengan pengujian dalam terowongan angin (*wind tunnel*) yang disebut dengan metode eksperimen :



Gambar 2.16 Pola garis arus (*streamline*) pada model mobil Artega GT

[Ref. 9]

Pada gambar 2.16 terlihat pola garis arus pada bagian permukaan atas model mobil Artega GT. Model mobil sudah dilengkapi dengan roda dan kaca spion. Bentuk body mobil didesain sebaik mungkin agar terjadi penundaan separasi pada titik tertentu sehingga area *wake* yang terjadi menjadi lebih kecil sehingga gaya hambat yang terjadi menjadi semakin kecil pula.



Gambar 2.17 Pola garis arus (*streamline*) pada mobil jenis *sports car* Porsche

[Ref. 9]

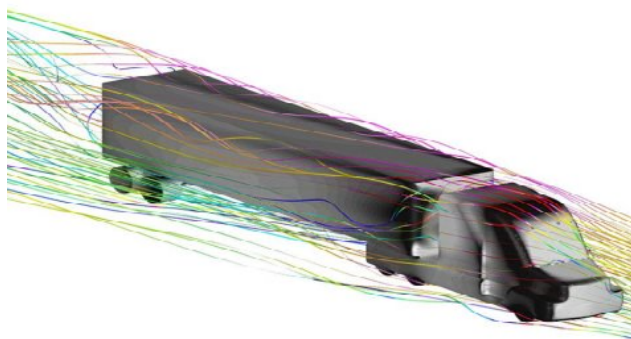
Gambar 2.17 memperlihatkan pola garis arus pada mobil Porsche dengan penambahan *front bumper* dan *spoiler*. Penambahan *front bumper* dan *spoiler* pada bagian depan body mobil bertujuan agar meningkatkan traksi (*traction*) dan dapat berpengaruh pada karakteristik-karakteristik pengemudian (*handling characteristics*).



Gambar 2.18 Pola garis arus (*streamline*) pada mobil jenis sedan convertible [Ref. 9]

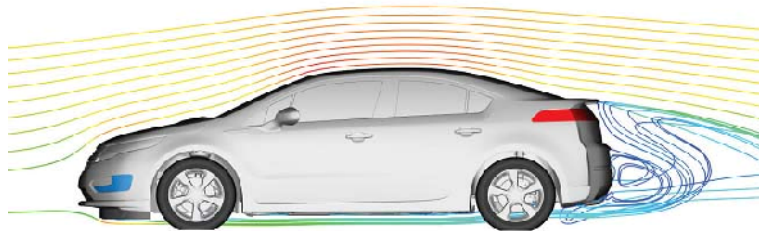
Terlihat pada gambar 2.18 pola garis arus yang melewati mobil jenis sedan *convertible* dengan atap mobil dan kaca belakang mobil terbuka. Dapat dilihat titik separasi yang terjadi lebih awal yaitu pada ujung kaca depan mobil, sehingga area wake yang terjadi semakin besar maka koefisien tahanannya juga semakin besar.

Sedangkan dibawah ini adalah beberapa contoh gambar pola garis arus (*streamline*) pada berbagai jenis mobil dengan menggunakan metode analisa numerik yaitu dengan memanfaatkan program untuk analisa aliran fluida yang sering disebut dengan CFD atau *Computational Fluid Dynamic* :



Gambar 2.19 Pola garis arus (*streamline*) pada model truk trailer [Ref. 10]

Penggunaan CFD (*Computational Fluid Dynamic*) untuk menganalisa aliran fluida lebih praktis dan efisien dari pada analisa dengan eksperimen. Analisa aliran fluida dengan menggunakan CFD (*Computational Fluid Dynamic*) lebih hemat biaya karena pembuatan model dapat dikerjakan dengan perangkat lunak CAD (*Computer Aided Design*) sedangkan pada analisa aliran fluida dengan metode eksperimen, pembuatan model di kerjakan secara manual dengan meterial tertentu yang membutuhkan biaya yang cukup mahal. Sebagai contoh pada gambar 2.19 memperlihatkan pola garis arus pada model truk trailer. Dari hasil simulasi yang sudah dilakukan dengan CFD kita dapat memprediksi dan menganalisa aliran fluida yang terjadi.



Gambar 2.20 Pola garis arus (*streamline*) pada model mobil sedan
[Ref 10]

Pada gambar 2.20 terlihat pola garis arus pada model mobil sedan dari hasil simulasi dengan CFD (*Computational Fluid Dynamic*). Dari gambar tersebut tampak area olakan yang disebabkan separasi aliran pada bagian belakang mobil. Area olakan tersebut dapat dikurangi agar koefisien tahanan menjadi semakin kecil dengan merubah bentuk bagian belakang model mobil tersebut. Pembuatan dan mendesain ulang model mobil dapat dikerjakan dengan menggunakan CAD (*Computer Aided Design*) yang biasanya sudah ada dalam paket perangkat lunak CFD (*Computational Fluid Dynamic*) itu sendiri. Perubahan bentuk model mobil akan menghasilkan karakteristik dan pola garis arus yang berbeda pula. Seperti pada gambar 2.21 model mobil balap formula 1 yang dibuat dengan bentuk sebaik mungkin agar menghasilkan aliran udara yang lebih bagus.



Gambar 2.21 Pola garis arus (*streamline*) pada model mobil balap formula 1
[Ref 10]

Sampai sekarang analisa dan prediksi aliran fluida yang melewati sebuah mobil masih terus di lakukan untuk mendapatkan koefisien tahanan yang semakin kecil. Tabel 2.1 menunjukan nilai koefisien tahanan dari beberapa jenis mobil dengan koefisien tahanan besar sampai mobil concept yang didesain sebaik mungkin agar menghasilkan koefisien tahanan yang lebih kecil.

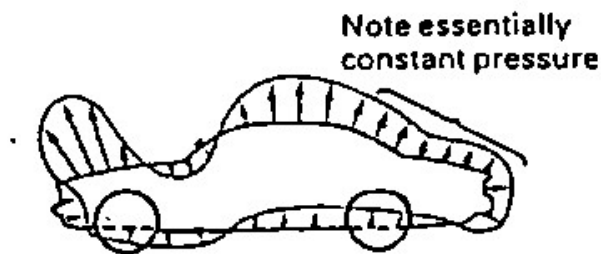
Tabel 2.1 Nilai koefisien tahanan beberapa jenis mobil [Ref. 11]

No.	Jenis Mobil	Tahun Produksi	Cd
1.	Hummer H2	2003	0.57
2.	Ford Escape Hybrid	2005	0.40
3.	Volkswagen Tiguan	2008	0.37
4.	Jaguar XKR	2005	0.35
5.	Mazda RX-8	2004	0.31
6.	Honda Civic Hybrid	2003-2005	0.28
7.	Nissan GT-R	2010-present	0.26
8.	Toyota Prius	2010	0.25
9.	BMW Vision Efficient Dynamics Concept	2009	0.22
10.	Volkswagen 1-litre car Concept	2002-2013 (planned production)	0.159

Meskipun pengurangan tahanan mungkin merupakan permasalahan aerodinamika yang paling penting dalam desain kendaraan, bukan berarti menjadi satu-satunya perhatian kita. Pertimbangan-pertimbangan aerodinamika lainnya dalam kendaraan adalah sebagai berikut:

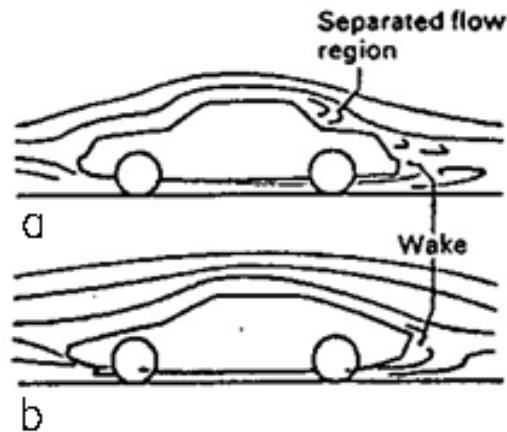
- Gaya-gaya aerodinamika sekunder seperti gaya angkat dan gaya samping.
- Persyaratan mengenai aliran udara ke dalam interior kendaraan untuk pendinginan mesin dan ventilasi kabin penumpang.
- Persyaratan mengenai pola aliran dekat permukaan yang cocok untuk meminimalkan penumpukan debu pada kendaraan dan pembuangan gas buang dari kendaraan.
- Kebisingan yang ditimbulkan secara aerodinamika [Ref. 6, hal.554].

Gambar 2.22 dan 2.23 memperlihatkan distribusi tekanan dan pola garis arus (*streamline*) untuk suatu mobil tertentu. Perhatikan bahwa tekanan permukaan bawah adalah lebih besar (mempunyai harga negatif yang lebih kecil) dari pada tekanan permukaan atas, mengakibatkan suatu gaya angkat. Gaya angkat ke atas adalah fenomena yang tidak diinginkan karena hal tersebut mengurangi traksi (*traction*) dan dapat berpengaruh merugikan pada karakteristik-karakteristik pengemudian (*handling characteristics*). Permasalahan yang ditimbulkan oleh gaya angkat tersebut tidak begitu penting bagi kendaraan penumpang dan kendaraan niaga biasa tetapi dapat menjadi penting bagi mobil balap kecepatan tinggi. Terkadang mobil-mobil balap dipasang perangkat “gaya angkat negatif” (“*negative lift*” devices) untuk meningkatkan traksi seperti tampak pada Gambar 2.2 [Ref. 6, hal. 554].



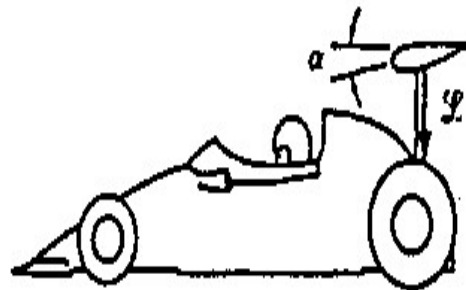
Gambar 2.22 Distribusi tekanan pada bidang simetri dari sebuah sedan

[Ref. 6, hal. 554]



Gambar 2.23 Pola-pola garis arus (*streamline*) untuk mobil (a) sedan dan (b) *fastback*

[Ref. 6, hal. 554]



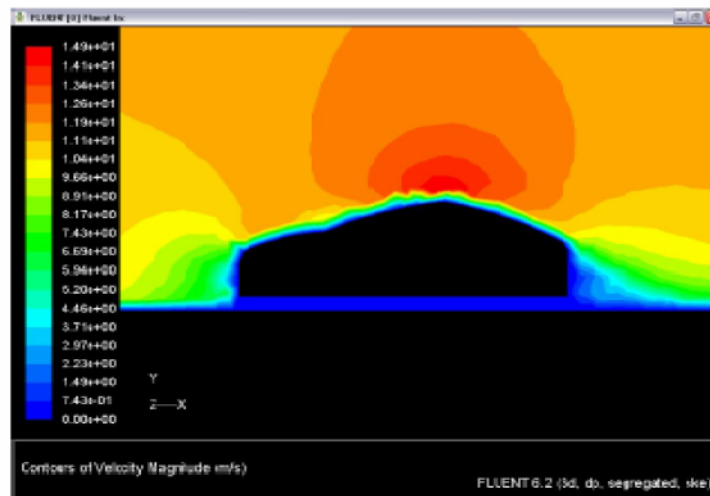
Gambar 2.24 *Airfoil* terbalik pada mobil balap untuk menghasilkan *down thrust*

[Ref. 6, hal. 548]

Aliran udara ke dalam kendaraan biasanya terjadi pada dua lokasi. Udara pendinginan mesin dan udara pembakaran biasanya masuk melalui bagian depan kendaraan. Penurunan tekanan akibat aliran udara melalui radiator berkontribusi kepada tahanan kendaraan. Udara ventilasi penumpang normalnya diambil pada daerah tekanan tinggi, daerah kecepatan rendah pada dasar kaca depan mobil (*windshield*). Pengangkutan debu dan partikel-partikel lainnya oleh aliran udara dapat mengakibatkan penumpukan-penumpukan pada jendela-jendela kendaraan, mengurangi jarak pandang. Permasalahan ini sangat besar pada mobil-mobil *station wagon* dimana aliran pusaran

balik di belakang kendaraan mengangkat debu atau air dari jalan dan menumpukkannya pada jendela belakang [Ref. 6, hal. 554].

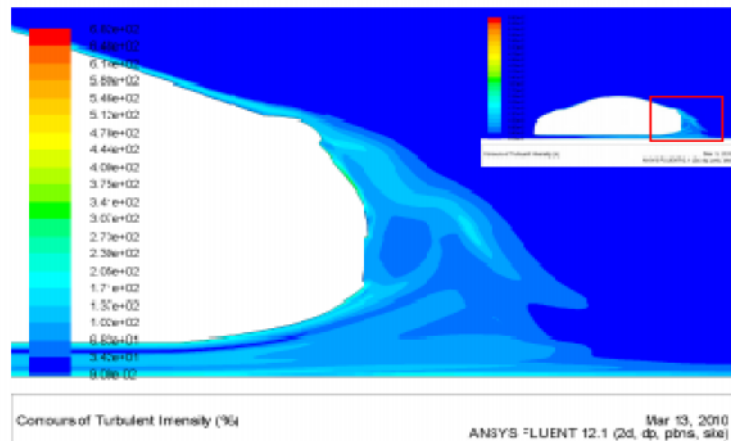
Kajian-kajian secara numerik mengenai pola aliran udara di sekitar *body* mobil telah dilakukan cukup banyak. Manan Desai dkk [Ref. 1] melakukan penelitian tentang gaya aerodinamika mobil secara eksperimen dan numerik. Hasilnya nilai kritis *drag coefficient* (Cd) pada eksperimen 0.4 dan secara numerik 0.55. Pada gambar 2.25 terlihat hasil simulasi secara numerik di tampilkan dalam *contour of velocity magnitude*.



Gambar 2.25 *Contour of Velocity Magnitude*

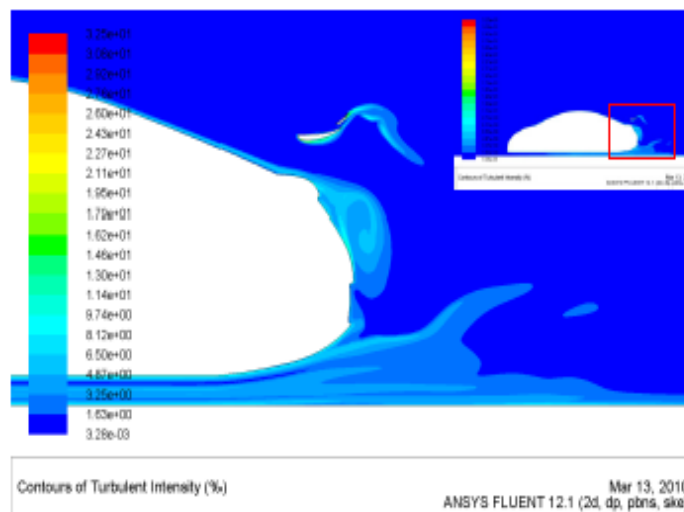
[Ref. 1]

Damjanovic dkk [Ref. 2] melakukan simulasi karakteristik aerodinamika mobil. Hasilnya dengan perubahan desain akan menghasilkan aliran udara yang lebih bagus saat melintasi mobil sehingga mobil akan menjadi lebih stabil dan menambah traksi. Gambar 2.26 dan 2.27 memperlihatkan perbedaan aliran udara saat melintasi mobil antara *Actual car* dan *Redesigned car*.



Gambar 2.26 *Turbulence intensity contours Actual car*

[Ref. 2]

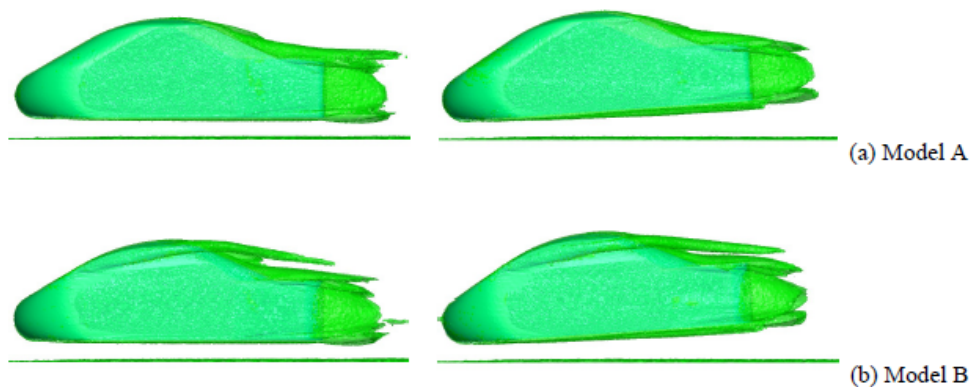


Gambar 2.27 *Turbulence intensity contours Redesigned car*

[Ref. 2]

Investigasi stabilitas laju kendaraan dari sudut pandang karakteristik aliran *steady* dan *unsteady*, seperti struktur *vortex* dan gerakanya di sekitar kendaraan dilakukan Takuji Nakashima dkk [Ref. 4]. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa pertimbangan dari karakteristik *unsteady aerodynamic* berdasarkan struktur aliran di

sekitar kendaraan adalah penting untuk mengevaluasi stabilitas kendaraan serta evaluasi konvensional berdasarkan *steady aerodynamics*. Gambar 2.28 menunjukkan perbedaan struktur aliran antara model A dan model B. Sheikh Ahmad Zaki [5] melakukan pengujian aliran fluida dua dimensi (2D) dan tiga dimensi (3D) untuk bentuk kendaraan Proton Iswara Aeroback dengan menggunakan FLUENT. Berdasarkan analisis yang dilakukannya, didapati bahwa nilai *drag coefficient* (C_D) dan *lift coefficient* (C_L) bagi model 2D untuk keadaan lantai statik masing-masing ialah 0.3794 dan -0.4797. Bagi keadaan lantai bergerak nilai C_D dan C_L masing-masing ialah 0.3776 dan -0.6187.



Gambar 2.28 Perbandingan struktur yang berpusar waktu rata-rata dalam simulasi kuasi-stasioner gerak pitch.

[Ref. 4]

BAB III

DASAR METODE KOMPUTASI FLUENT

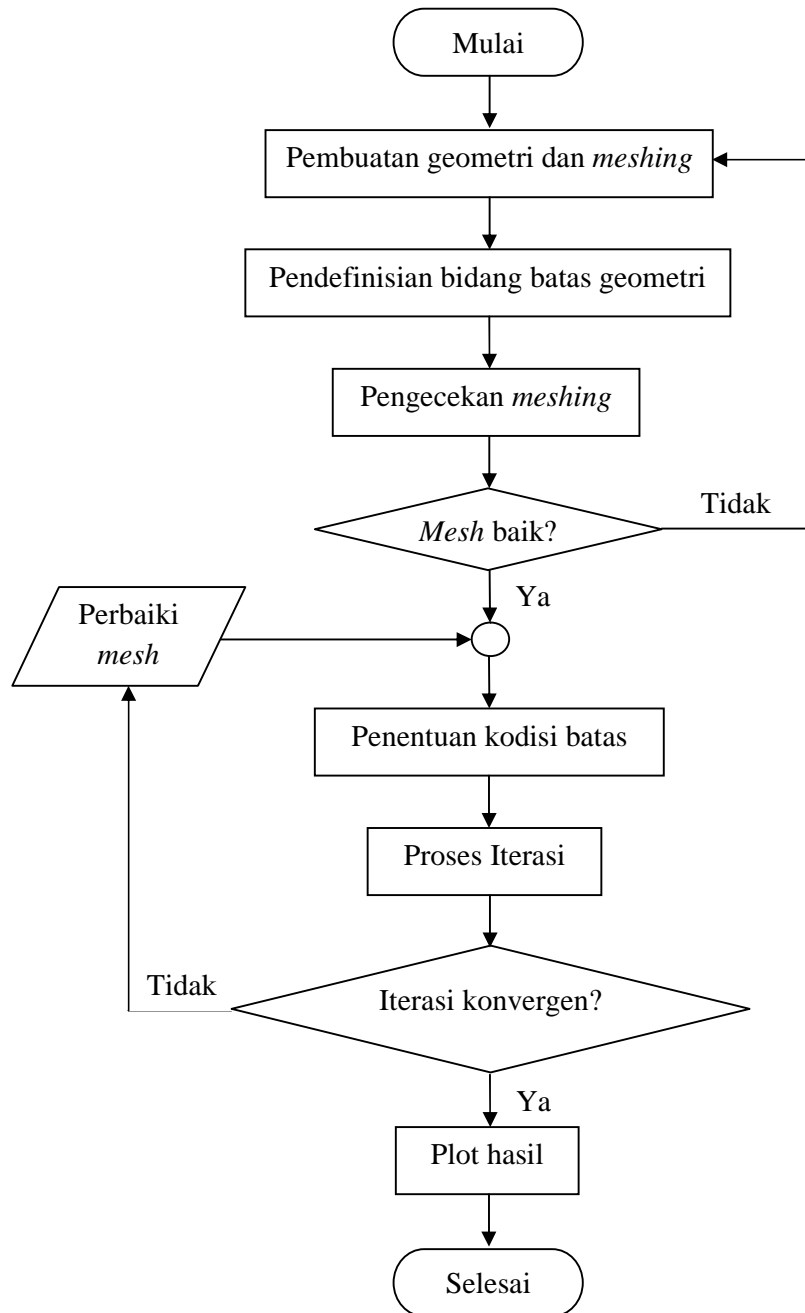
3.1. FLUENT

Simulasi yang dilakukan dalam tugas akhir ini menggunakan FLUENT versi 6.3.26. FLUENT sendiri merupakan salah satu jenis program CFD (*Computational Fluid Dynamics*) yang menggunakan metode diskritisasi volume hingga. FLUENT memiliki fleksibilitas *mesh*, sehingga kasus-kasus aliran fluida yang memiliki *mesh* tidak terstruktur akibat geometri benda yang rumit dapat diselesaikan dengan mudah. Selain itu, FLUENT memungkinkan untuk penggenerasian *mesh* lebih halus atau lebih besar dari *mesh* yang sudah ada berdasarkan pemilihan solusi aliran [Ref. 11, hal.1-1].

Dalam menyelesaikan suatu kasus, FLUENT memiliki beberapa langkah pengerjaan, yaitu:

1. Membuat geometri dan *mesh* pada model.
2. Memilih *solver* yang tepat untuk model tersebut (2D atau 3D).
3. Mengimpor *mesh* model (grid).
4. Melakukan pemeriksaan pada *mesh* model.
5. Memilih formulasi *solver*.
6. Memilih persamaan dasar yang akan dipakai dalam analisa.
7. Menentukan sifat material yang akan dipakai.
8. Menentukan kondisi batas.
9. Mengatur parameter kontrol solusi.
10. *Initialize the flow field*.
11. Melakukan perhitungan/iterasi.
12. Menyimpan hasil iterasi.
13. Jika diperlukan, memperhalus grid kemudian melakukan iterasi ulang.

[Ref. 13, hal. 138]



Gambar 3.1 Diagram alir prosedur simulasi FLUENT [Ref. 13, hal 140]

3.2. SKEMA NUMERIK

FLUENT memberikan dua pilihan metode numerik, yaitu metode *segregated* dan *coupled*. Kedua metode tersebut dapat digunakan untuk memecahkan persamaan integral kekekalan momentum, massa, dan energy (*governing integral equation*), serta

besaran skalar lainnya seperti turbulensi. Dalam proses pemecahan masalah, baik metode *segregated* dan *coupled* memiliki persamaan yaitu menggunakan teknik kontrol volume. Teknik kontrol volume sendiri terdiri dari:

- Pembagian daerah asal (*domain*) ke dalam kontrol volume diskrit dengan menggunakan grid komputasi.
- Integrasi persamaan umum kontrol volume untuk membuat persamaan aljabar dari variabel tak-bebas yang berlainan (*discrete dependent variables*) seperti kecepatan, tekanan, suhu, dan sebagainya
- Linearisasi persamaan dan solusi diskritisasi dari resultan sistem persamaan linear untuk menghasilkan nilai taksiran variabel tak-bebas.

Pada dasarnya metode *segregated* dan *coupled* memiliki persamaan dalam proses diskritisasi yaitu volume berhingga (*finite volume*), tetapi memiliki perbedaan pada cara pendekatan yang digunakan untuk melinearisasi dan memecahkan suatu permasalahan [Ref. 12, hal. 17-2].

3.2.1. Metode Solusi *Segregated*

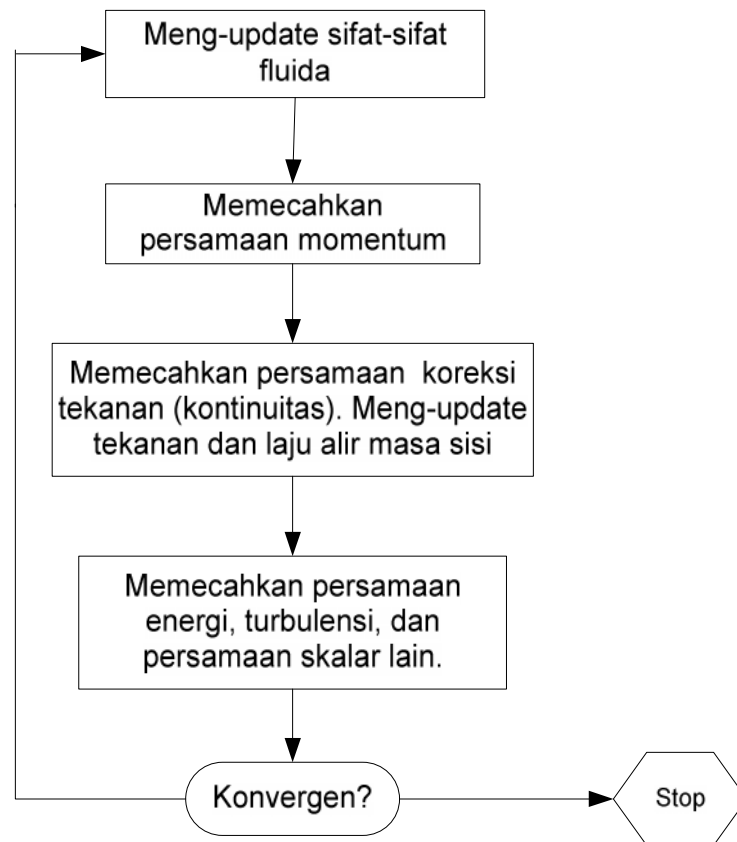
Metode ini menyelesaikan persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi secara bertahap atau terpisah satu sama lain. Karena persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi merupakan persamaan non-linear, beberapa iterasi harus dilakukan secara berulang-ulang sebelum solusi yang konvergen diperoleh. Dalam iterasi terdiri dari beberapa langkah, yaitu:

1. Sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi yang telah dilakukan. Untuk perhitungan awal, sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi awal (*initialized solution*).
2. Persamaan momentum u , v , dan w dipecahkan dengan menggunakan nilai-nilai tekanan dan fluks massa permukaan, supaya medan kecepatan diperbaharui.
3. Karena kecepatan yang diperoleh dalam tahap yang pertama tidak mungkin memenuhi persamaan kontinuitas secara lokal, persamaan “Poisson-type” untuk koreksi tekanan diturunkan dari persamaan kontinuitas dan persamaan momentum linear. Persamaan koreksi tekanan ini kemudian dipecahkan untuk

memperoleh koreksi yang dibutuhkan untuk medan tekanan dan kecepatan serta fluks massa permukaan sampai kontinuitas dipenuhi.

4. Menyelesaikan persamaan-persamaan untuk besaran skalar seperti turbulensi, energi, radiasi dengan menggunakan nilai-nilai variabel lain yang telah diperbaharui.
5. Mengecek konvergensi persamaan.

[Ref. 12, hal. 17-3]



Gambar 3.2 Diagram alir metode solusi *segregated* [Ref. 12, hal. 17-4]

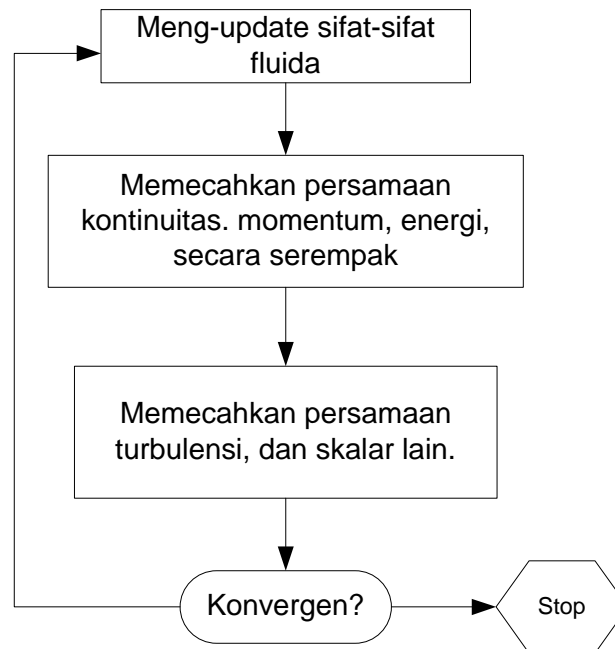
3.2.2. Metode Solusi *Coupled*

Metode ini menyelesaikan persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi secara serempak atau bersamaan (*simultaneously*). Karena persamaan kekekalan massa, momentum, dan energi merupakan persamaan non-linear, beberapa iterasi harus

dilakukan secara berulang-ulang sebelum solusi yang konvergen diperoleh. Dalam iterasi terdiri dari beberapa langkah, yaitu:

1. Sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi yang telah dilakukan. Untuk perhitungan awal, sifat-sifat fluida diperbaharui berdasarkan solusi awal (*initialized solution*).
2. Persamaan kontinuitas, momentum, dan energi jika ada serta besaran-besaran tertentu lainnya dipecahkan secara serempak.
3. Jika ada, persamaan-persamaan skalar seperti turbulensi dan radiasi dipecahkan dengan menggunakan nilai yang diperbaharui sebelumnya berdasarkan variable yang lain.
4. Mengecek konvergensi persamaan.

[Ref. 12, hal. 17-5]



Gambar 3.3 Diagram alir metode solusi *coupled* [Ref. 12, hal. 17-6]

3.3. MODEL TURBULEN (*TURBULENCE MODELS*)

Aliran turbulen adalah suatu karakteristik yang terjadi karena adanya peningkatan kecepatan aliran. Peningkatan ini mengakibatkan perubahan momentum, energi, dan massa tentunya. Karena terlalu mahal untuk melakukan analisa secara

langsung dari aliran turbulen yang memiliki skala kecil dengan frekuensi yang tinggi, maka diperlukan suatu manipulasi agar menjadi lebih mudah dan murah. Salah satunya adalah dengan permodelan turbulen (*turbulence model*). Meskipun demikian, modifikasi persamaan yang meliputi penambahan variabel yang tidak diketahui, dan permodelan turbulen perlu untuk menentukan variabel yang diketahui [Ref. 12, hal. 9-1 – 9-2].

FLUENT sendiri menyediakan beberapa permodelan, diantaranya adalah k - dan k - .

3.3.1. Permodelan k -epsilon (k -)

3.3.1.1. *Standard*

Model ini merupakan model turbulensi semi empiris yang lengkap. Walaupun masih sederhana, memungkinkan untuk dua persamaan yaitu kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scale*) ditentukan secara bebas (*independent*). Model ini dikembangkan oleh Jones dan Launder. Kestabilan, ekonomis (dari segi komputansi), dan akurasi yang cukup memadai membuat model ini sering digunakan dalam simulasi fluida dan perpindahan panas [Ref. 12, hal. 9-7].

3.3.1.2. *RNG*

Model ini diturunkan dengan menggunakan metode statistik yang teliti (teori renormalisasi kelompok). Model ini merupakan perbaikan dari metode *k-epsilon standard*, jadi bentuk persamaan yang digunakan sama. Perbaikan yang dimaksud meliputi:

- Model RNG memiliki besaran tambahan pada persamaan laju disipasi (*epsilon*), sehingga mampu meningkatkan akurasi untuk aliran yang terhalang secara tiba-tiba.
- Efek putaran pada turbulensi juga telah disediakan, sehingga meningkatkan akurasi untuk jenis aliran yang berputar (*swirl flow*).
- Menyediakan formulasi analitis untuk bilangan Prandtl turbulen, sementara model *k-epsilon standard* menggunakan nilai bilangan Prandtl yang ditentukan pengguna (kostan).
- Model RNG menyediakan formulasi untuk bilangan Reynold rendah, sedang model *standard* merupakan model untuk Reynold tinggi [Ref. 12, hal. 9-8].

3.3.1.3. *Realizable*

Merupakan model pengembangan yang relatif baru dan berbeda dengan model *k-epsilon standar* dalam dua hal, yaitu:

- Terdapat formulasi baru untuk memodelkan viskositas turbulen.
- Sebuah persamaan untuk dissipasi, ϵ , telah diturunkan dari persamaan yang digunakan untuk menghitung fluktuasi vortisitas rata-rata.

Istilah *realizable* memiliki arti bahwa model tersebut memenuhi beberapa batasan matematis pada bilangan Reynold, konsisten dengan bentuk fisik aliran turbulen. Kelebihannya adalah lebih akurat untuk memprediksi laju penyebaran fluida dari pancaran jet/nosel. Model ini memberikan performa yang bagus untuk aliran yang melibatkan putaran, lapisan batas yang memiliki gradient tekanan yang besar, separasi, dan resirkulasi [Ref. 12, hal. 9-9].

3.3.2. Permodelan *k-omega (k- ω)*

3.3.2.1. *Standard*

Model yang terdapat dalam FLUENT merupakan model berdasarkan Wilcox *k-omega* yang memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada bilangan Reynold rendah, kompresibilitas, dan penyebaran aliran geser (*shear flow*). Selain itu, model ini juga mampu diaplikasikan untuk aliran dalam saluran maupun aliran bebas geseran (*free shear flow*) [Ref. 13, hal. 152].

3.3.2.2. *SST*

Model ini dikembangkan oleh Menter untuk memadukan formulasi model *k-omega standard* yang stabil dan akurat pada daerah dekat ke dinding dengan model *k-epsilon* yang memiliki kelebihan pada aliran *free stream*. Model ini mirip dengan *k-omega standard* dengan memiliki beberapa perbaikan, yaitu:

- Model *k-omega standard* dan *k-epsilon* yang telah diubah dikalikan dengan suatu fungsi pencampuran dan kedua model digunakan bersama-sama, sehingga lebih akurat untuk daerah dekat dinding maupun untuk aliran yang jauh dari dinding dan *free stream flow*.
- Definisi viskositas turbulen dimodifikasi untuk menghitung perubahan tegangan geser turbulen.

- Konstanta model berbeda dengan model *k-omega* standar.
- Melibatkan sebuah besaran dari penurunan *damped cross diffusion* pada persamaan *omega*.

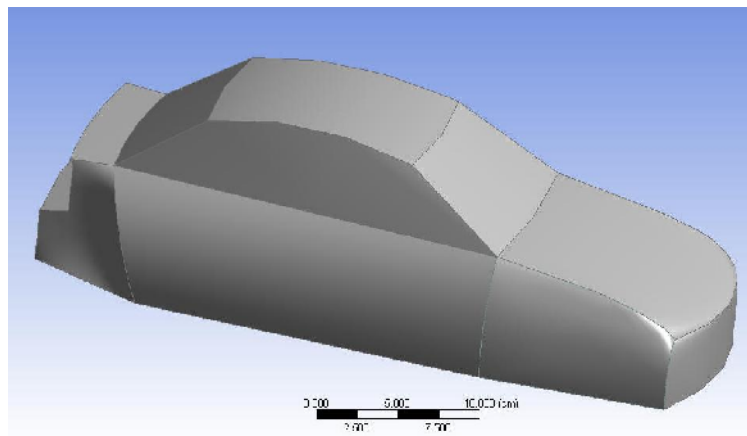
[Ref. 13, hal. 153-154]

BAB IV

SIMULASI NUMERIK FLUENT 6.3.26

4.1. MODEL BENDA

Simulasi dalam tugas akhir ini dilakukan pada jenis mobil sedan, yaitu BMW seri 320i tahun produksi 2010. Adapun model yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Model mobil BMW 320i tahun 2010



Gambar 4.2 Mobil BMW 320i tahun 2010

4.2. PROSES SIMULASI

Proses simulasi dalam tugas akhir ini secara umum terbagi dalam beberapa langkah, yaitu *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*.

1. *Preprocessing*.

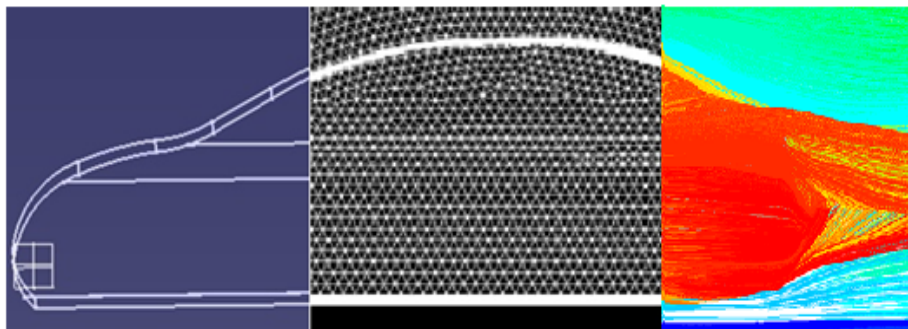
Tahapan ini merupakan tahapan awal dalam melakukan proses analisa dengan menggunakan CFD. Dalam tahapan ini dilakukan dua hal, yaitu permodelan benda dan penggenerasian *mesh*. Untuk membuat permodelan benda dan penggenerasian *mesh* menggunakan GAMBIT (*Geometry And Mesh Building Intelligent Toolkit*) 2.3.16.

2. *Solving*.

Merupakan tahapan utama dari simulasi dengan CFD, yaitu dengan melakukan iterasi atau perhitungan dari kondisi-kondisi batas yang telah ditentukan dalam tahapan *preprocessing*.

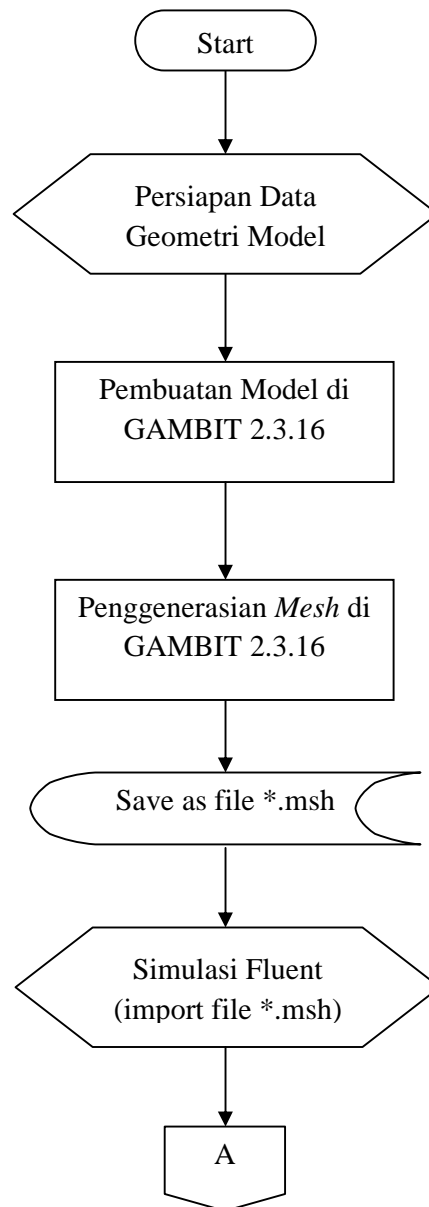
3. *Post processing*.

Tahapan terakhir dari simulasi CFD adalah mengolah dan menginterpretasikan hasil yang telah diperoleh, berupa gambar dan grafik.

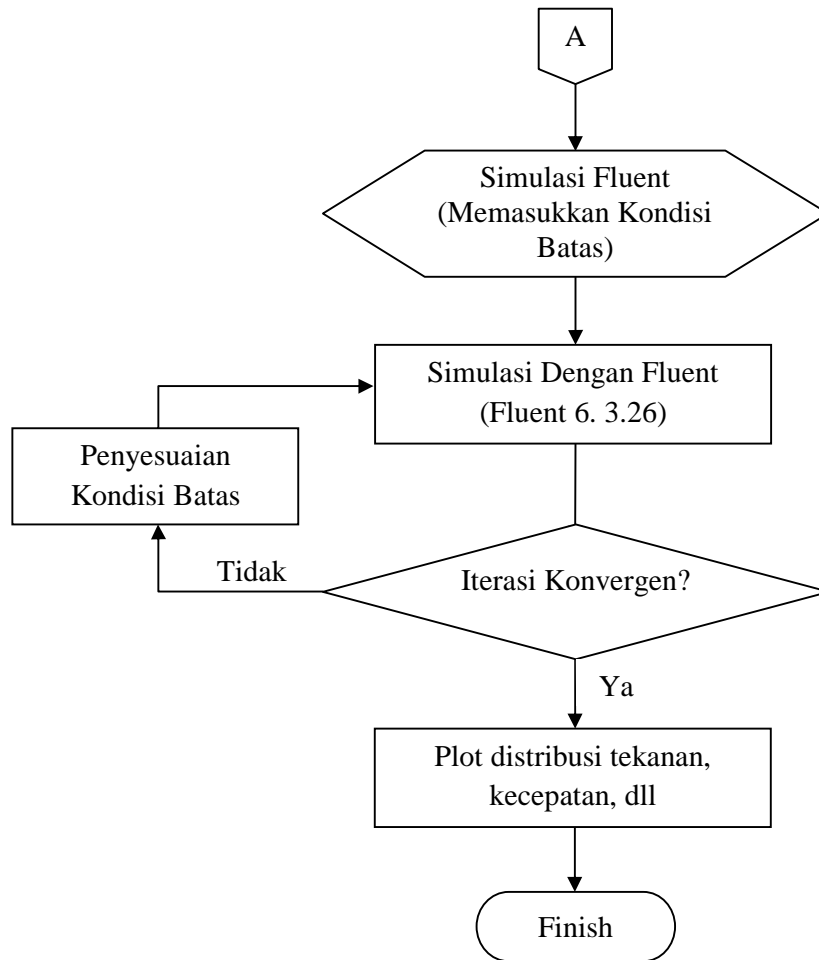


Gambar 4.3 Proses simulasi CFD: CAD, *mesh*, dan hasil CFD

Diagram alir dari proses pada tugas akhir ini dapat dilihat pada Gambar 4.4- 4.5.



Gambar 4.4 Diagram alir 1

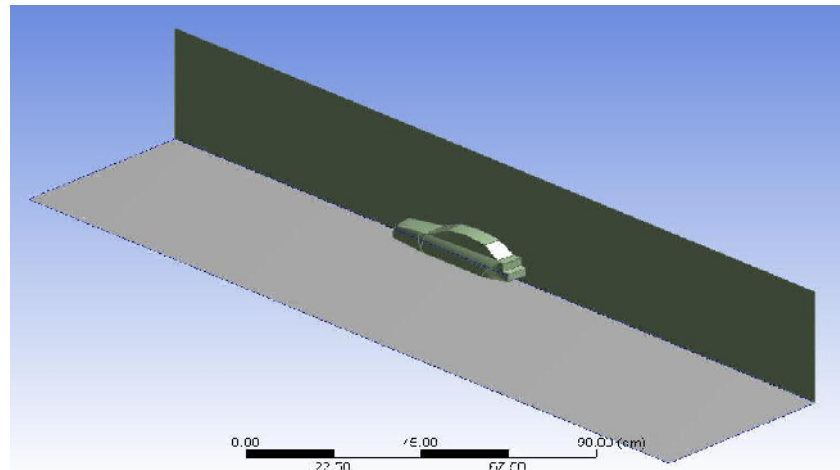


Gambar 4.5 Diagram alir 2 (lanjutan 1)

4.3. SIMULASI AERODINAMIKA MODEL SEDAN BMW 320i

4.3.1. Model Komputasi

Model sedan BMW 320i dalam simulasi ini ditempatkan dalam suatu ruangan segi empat yang digunakan sebagai *domain* dalam FLUENT. Ruangan tersebut diidealisasikan sebagai terowongan angin (*wind tunnel*). Dilakukan beberapa pengkondisian agar domain tersebut dapat diidealisasikan layaknya jalan raya. Bentuk dari domain tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.6. Untuk menghemat waktu komputansi, dilakukan pembagian domain tersebut oleh suatu bidang *symmetry*. Pembagian bidang tersebut tidak akan mempengaruhi hasil yang diperoleh.



Gambar 4.6 *Domain* komputasi setengah bagian

Dimensi *domain* pada Gambar 4.6 adalah sebagai berikut :

Panjang = 2332 cm

Lebar = 534 cm

Tinggi = 488 cm

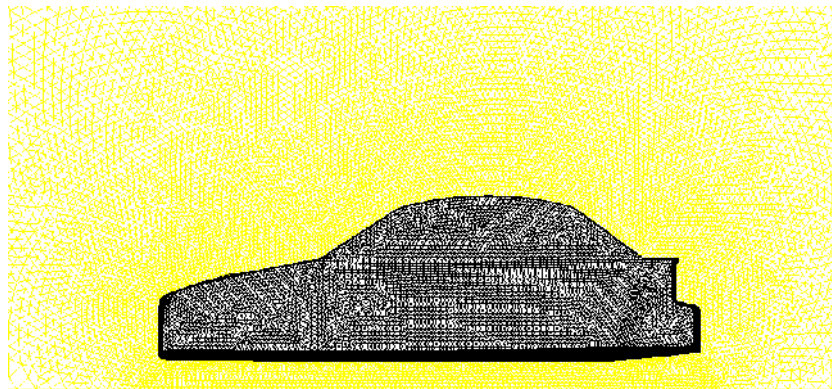
Beberapa idealisasi yang dilakukan adalah:

1. Dinding-dinding seksi pengujian bagian atas, bawah dan samping pada terowongan angin diidealisasikan dan didefinisikan sebagai *wall* dengan kondisi *no slip*, sedangkan dinding yang membagi model mobil menjadi setengah bagian didefinisikan sebagai simetri, sehingga tidak mempengaruhi hasil perhitungan.
2. Idealisasi yang dilakukan pada model BMW 320i sendiri diantaranya adalah grill depan dan semua lubang yang terdapat pada mobil aslinya diidealisasikan tertutup rapat, kaca depan diidealisasikan sebagai kaca datar tanpa sikat kaca, kaca spion samping dan roda tidak disertakan dalam simulasi.

4.3.2. Penggenerasian *Mesh*

Dalam pemodelan BMW 320i ini, penggenerasian *mesh* dilakukan secara bertahap. Pada tahap pertama dilakukan penggenerasian *surface mesh* pada permukaan model mobil tersebut dengan elemen *triangular* atau segitiga menggunakan GAMBIT. Pada tahap berikutnya dilakukan penggenerasian *volume mesh* pada ruangan

terowongan angin setelah sebelumnya dilakukan manipulasi grid pada sisi-sisi simetrinya. Manipulasi grid ini dimaksudkan untuk mendapatkan kerapatan *mesh* yang berbeda sehingga diperoleh kerapatan yang lebih besar pada daerah-daerah yang menjadi pusat perhatian dan sebaliknya pada daerah-daerah lain kerapatannya lebih kecil. Dengan demikian dapat diperoleh suatu bentuk penggenerasian *mesh* yang optimal dan dapat menghemat waktu dan usaha perhitungan komputasi. Penggenerasian *volume mesh* di sini menggunakan elemen *3D hybrid mesh* dan tipe penggenerasian TGRID. Gambar 4.7 memperlihatkan hasil penggenerasian *3D hybrid mesh TGRID* tersebut.



Gambar 4.7 Hasil penggenerasian mesh pada domain setengah bagian

4.3.3. Simulasi Kasus

4.3.3.1. Sifat Fluida (*Fluid Property*)

Adapun sifat fluida (*fluid properties*) yang digunakan adalah konstan, dengan spesifikasi sebagai berikut :

- Jenis fluida = udara (*air*)
- Kerapatan fluida, ρ = 1,225 kg/m³
- Viskositas absolut fluida, μ = 1,7894e - 05 kg/m-s

Sifat fluida, μ dan ρ dievaluasi pada suhu 27 °C pada tekanan atmosfer. FLUENT memilih harga-harga ini sebagai *default* untuk material udara.

4.3.3.2. *Turbulence Models*

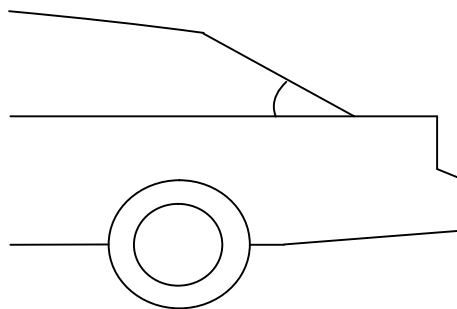
Model turbulen yang digunakan untuk tugas akhir ini adalah model turbulen *k-omega (k- ω) SST*. Alasan pemilihan model turbulen tersebut karena memiliki ketelitian hasil yang baik dibandingkan dengan model turbulen yang lain sebagaimana sudah dilakukan simulasi FLUENT oleh Mustofa Zuhri [Ref. 14] pada kajian tugas akhirnya. Dari model turbulen ini akan diperoleh keakuratan hasil yang berupa koefisien tahanan yang divalidasi dengan data eksperimen pabrikan.

4.3.3.3. *Velocity*

Kecepatan yang digunakan dalam simulasi ini disesuaikan dengan kecepatan maksimum mobil BMW 320i dari data pabrikan yaitu 228 km/jam atau selitar 63,33 m/s. Dengan demikian akan diperoleh nilai koefisien drag (C_d) yang mendekati aktual sesuai data teknis pabrikan.

4.3.3.4. *Variasi Sudut Kaca Belakang Mobil*

Pada tugas sarjana ini akan dilakukan simulasi dengan variasi sudut kaca belakang model mobil. Tujuannya untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai koefisien drag (C_d) dan fenomena aliran yang terjadi. Gambar sudut kaca belakang mobil dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan Tabel 4.1 menunjukkan variasi besar sudut kaca belakang mobil.



Gambar 4.8 Sudut kaca belakang mobil ()

Tabel 4.1 Variasi model mobil dengan sudut kaca belakang (°)

No.	Jenis Mobil	Sudut Kaca Belakang (°)
1.	Acuan (<i>Original Design</i>)	35.8 ⁰
2.	Model 1	33.7 ⁰
3.	Model 2	32.2 ⁰
4.	Model 3	29.9 ⁰
5.	Model 4	28.2 ⁰
6.	Model 5	25.7 ⁰

BAB V

ANALISA

5.1. SIMULASI GRID

Simulasi grid dilakukan dengan memanfaatkan fasilitas yang disediakan oleh FLUENT. Tujuan proses ini adalah untuk mendapatkan *independent grid* atau hasil yang tidak lagi tergantung dengan jumlah grid. Simulasi grid dilakukan dengan menambah jumlah grid pada dinding dengan cara adaptasi. Besaran yang diamati pada simulasi grid adalah nilai koefisien drag yang terjadi pada model mobil sedan BMW 320i.

Tabel 5.1 Hasil Simulasi Grid model mobil sedan BMW 320i pada kecepatan 63.33 m/s

No.	Jenis Grid	Jumlah sel	C_d	Error (%)
1.	Original grid	92.349	0.295	-
2.	Adapsi 1	144.338	0.292	1.02
3.	Adapsi 2	209.536	0.292	0
4.	Adapsi 3	334.913	0.291	0.34
5.	Adapsi 4	444.115	0.294	-1.02

Berdasarkan hasil yang ditampilkan pada Tabel 5.1 *coefficient drag* menunjukkan kestabilan pada adaptasi kedua dan ketiga, sehingga dapat diambil kesimpulan adaptasi kedua dengan jumlah sel grid 209.536 buah dan nilai error terendah sebagai *independent grid*.

5.2. SIMULASI VARIASI BILANGAN REYNOLD

Setelah melakukan simulasi grid untuk mendapatkan *independent grid*, kemudian dilakukan simulasi variasi Bilangan Reynold untuk mengetahui hubungan antara kecepatan aliran udara, Bilangan Reynold dan koefisien *drag*. Pada simulasi ini divariasikan kecepatan aliran udara 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s dan 50 m/s karena pada data teknis mobil sedan BMW 320i diketahui kecepatan maksimum mobil ini

adalah 228 km/jam atau sekitar 63.33 m/s sehingga divariasikan kecepatan kurang dari kecepatan maksimum. *Gradient option* pada simulasi ini menggunakan *Green-Gauss Cell Based* yaitu perhitungan berdasarkan jumlah sel sehingga simulasi tidak memerlukan waktu yang terlalu lama, akan tetapi hasil simulasi menjadi kurang akurat.

Tabel 5.2 Hasil Simulasi variasi Bilangan Reynold pada model mobil sedan BMW 320i

No.	V (m/s)	Reynold Number (<i>Re</i>)	<i>Cd</i>
1.	10	2900000	0.297
2.	20	5800000	0.296
3.	30	8700000	0.295
4.	40	12000000	0.293
5.	50	15000000	0.292

Pada Tabel 5.2 dapat dilihat hubungan antara kecepatan aliran, bilangan Reynold dan koefisien *drag*. Semakin besar kecepatan alirannya maka semakin besar pula bilangan Reynold, tetapi koefisien *drag* menjadi semakin kecil sesuai dengan gambar 2.11 pada referensi 7, hal 418 dimana dapat terlihat pada gambar tersebut hubungan antara bilangan Reynold dan koefisien *drag* pada plat datar dan halus.

5.3. SIMULASI TURBULENCE MODELS

Model turbulensi yang digunakan pada simulasi kasus ini adalah *k-omega SST*. Dari simulasi tersebut diperoleh nilai koefisien tahanan yang akan dibandingkan dengan nilai koefisien tahanan dari pabrikan. Pemodelan turbulensi secara detail dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Model solusi dalam komputasi dan simulasi

<i>Solver</i>	
<i>Gradient Option</i>	<i>Green-Gauss Node Based</i>
<i>Time</i>	<i>Steady</i>
<i>Viscous Model</i>	
<i>Model</i>	<i>k-omega SST</i>

<i>Solution Control</i>	
<i>Discretization</i>	
<i>Pressure</i>	<i>Second Order</i>
<i>Momentum</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Turbulence Kinetic Energy</i>	<i>Second Order Upwind</i>
<i>Specific Dissipation Rate</i>	<i>Second Order Upwind</i>

Pemilihan *green-gauss based* pada *gradient option* bertujuan agar menambah keakuratan pada hasil simulasi karena perhitungannya berdasarkan jumlah nodal. Pada pemilihan *discretization*, *pressure*, *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *specific dissipation rate* menggunakan *second order* berfungsi juga untuk meningkatkan akurasi pada hasil simulasi, akan tetapi proses *iterasi* atau perhitungannya juga semakin membutuhkan waktu yang lebih lama.

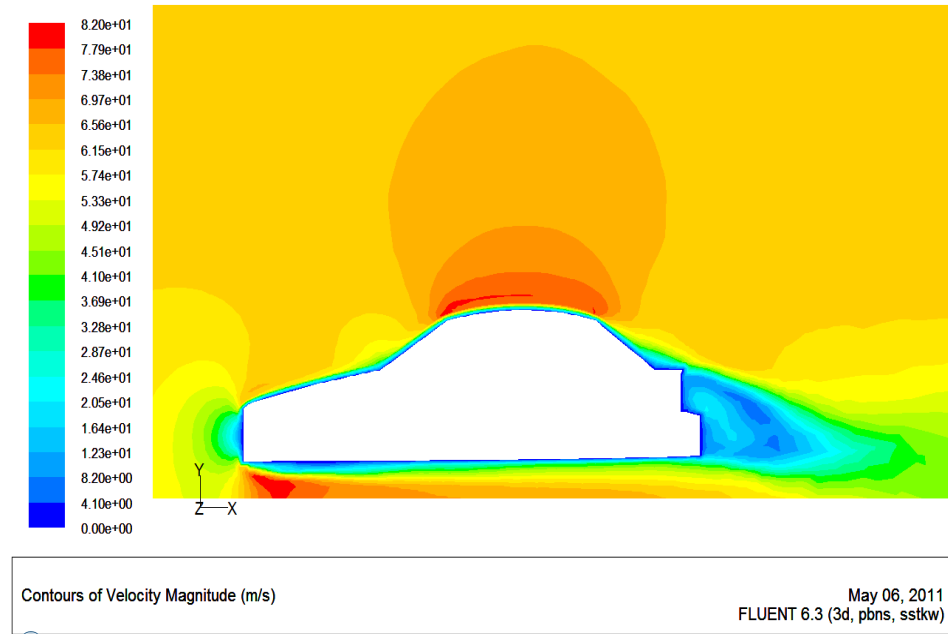
Perbandingan nilai koefisien tahanan hasil simulasi pada kecepatan maksimum mobil 228 km/jam atau sekitar 63.33 m/s (*Reynold Number* = 21000000) dengan pabrikan dapat dilihat pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Koefisien tahanan hasil simulasi dan pabrikan (actual)

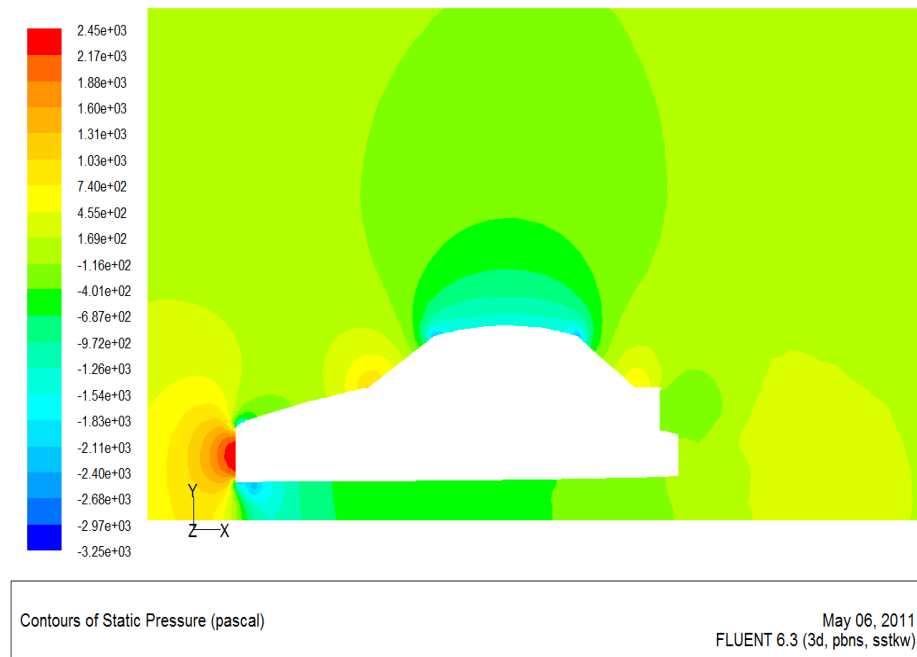
Model Viskos	<i>Cd</i> Simulasi	<i>Cd</i> Pabrikan	% error
<i>k-omega SST</i>	0.288	0.270	1.80

Model *k-omega SST* memiliki kestabilan dan akurasi menganalisa aliran yang ada di dekat batas. *K-omega SST* memeberikan hasil akurasi simulasi dengan nilai *error* yang relatif kecil yaitu 1.80 %. Kelemahan model *k-omega SST* adalah membutuhkan daya dan waktu komputasi yang lebih besar daripada model yang lain.

Hasil simulasi yang telah dilakukan pada mobil acuan dengan model *k-omega SST* dapat ditampilkan pada gambar berikut :



Gambar 5.1 Kontur kecepatan pada model mobil acuan

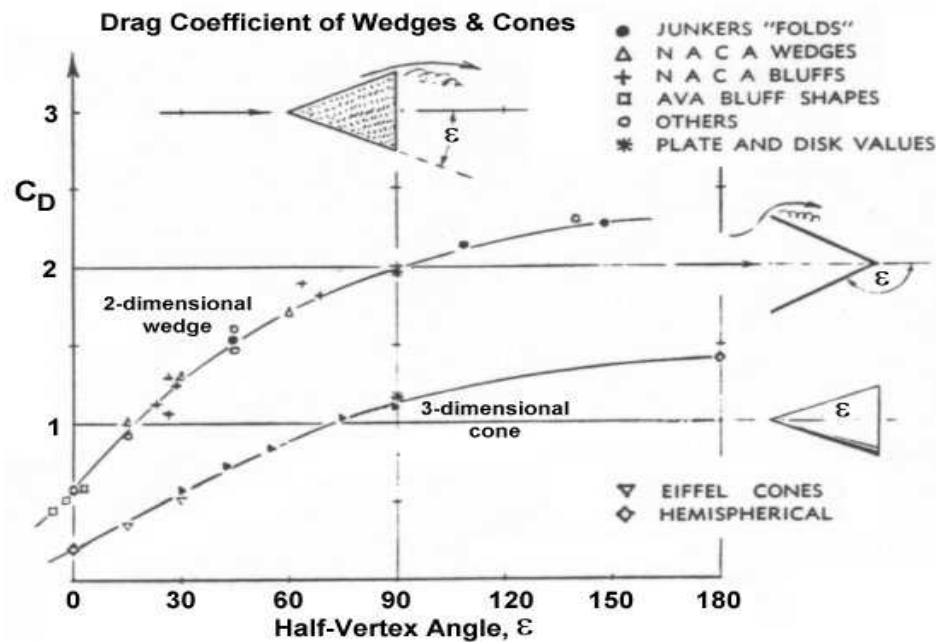


Gambar 5.2 Kontur distribusi tekanan pada model mobil acuan

5.4. SIMULASI VARIASI SUDUT KACA BELAKANG MOBIL

Fenomena penurunan *drag* akibat pengecilan penampang pada ujung akhir dari sebuah kendaraan dapat diidealisasikan dengan bentuk yang sederhana yaitu fluida yang mengalir pada permukaan silinder pejal tegak lurus terhadap sumbu, dimana pada saat aliran bersifat *viscous* maka ada separasi pada bagian silinder. Titik separasi terjadi pada titik tertentu dibagian belakang silinder pejal yang disebut dengan titik separasi (*point of separation*). Hal ini diterapkan pada bagian belakang mobil, dimana sudut pengecilan penampang dibuat sedemikian rupa sehingga menyerupai fenomena yang terjadi pada sebuah silinder pejal. Dalam tugas sarjana ini ditunjukkan pengaruh variasi sudut kaca belakang mobil terhadap nilai koefisien tahanan yang diperoleh.

Hubungan antara sudut penampang dengan koefisien tahanan dapat ditunjukkan pada Gambar 5.3. Gambar tersebut merupakan hubungan sudut penampang dengan koefisien tahanan untuk benda dua dimensi dan tiga dimensi. Dalam gambar memperlihatkan bahwa semakin kecil sudut penampang semakin kecil koefisien tahanan yang diperoleh.



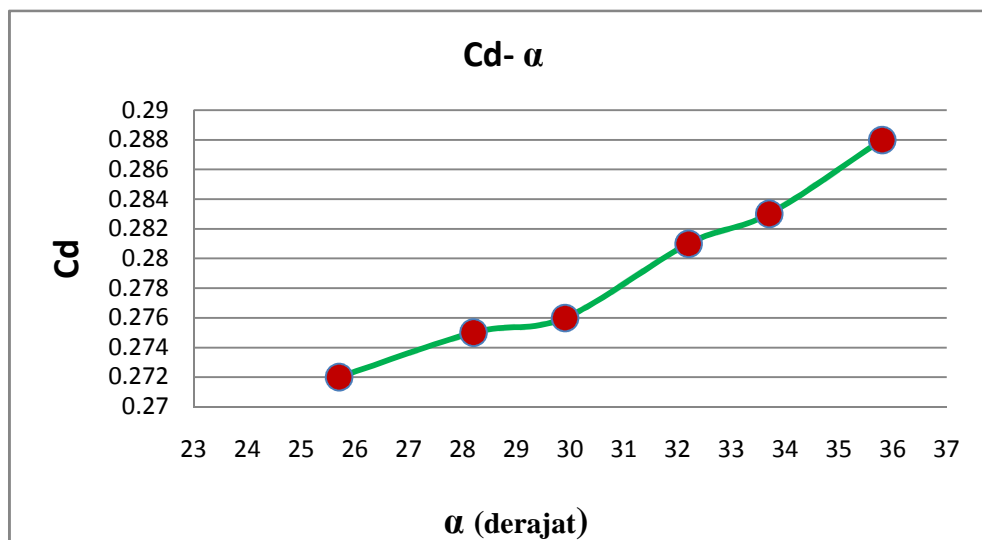
Gambar 5.3 Hubungan sudut penampang dengan koefisien tahanan [Ref. 15]

Variasi sudut kaca belakang mobil yang digunakan dalam tugas sarjana ini diperoleh dari pengecilan sudut kaca belakang mobil. Kecepatan yang dipakai dalam simulasi ini disamakan dengan kecepatan maksimum mobil dari data pabrikan yaitu 228 km/jam atau selitar 63,33 m/s. Kecepatan tersebut memiliki batas sebelum terjadinya perubahan aliran dari *incompressible* ke *compressible*. Batasannya adalah berupa bilangan Mach, $Ma < 0.3$. Kecepatan yang diperbolehkan untuk kondisi udara pada keadaan standar adalah sekitar 100 m/s [Ref. 7, hal. 33]. Dengan demikian, kecepatan maksimal yang digunakan dalam tugas sarjana ini masih dalam batas aman untuk daerah aliran *incompressible*.

Setelah dilakukan proses simulasi diperoleh hasil untuk sudut kaca belakang besar memiliki koefisien tahanan yang besar, dan untuk sudut kaca belakang kecil memiliki koefisien tahanan yang kecil. Nilai koefisien tahanan yang diperoleh dari hasil simulasi disajikan pada Tabel 5.5. Hubungan sudut kaca belakang dengan koefisien tahanan yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 5. 4.

Tabel 5.5 Koefisien tahanan untuk variasi sudut kaca belakang (α)

No.	Jenis Mobil	Sudut Kaca Belakang (α^0)	Cd
1.	Model Acuan	35.8	0.288
2.	Model 1	33.7	0.283
3.	Model 2	32.2	0.281
4.	Model 3	29.9	0.276
5.	Model 4	28.2	0.275
6.	Model 5	25.7	0.272



Gambar 5.4 Grafik hubungan sudut kaca belakang (α) dengan koefisien tahanan (Cd)

Sedangkan prosentase reduksi (\check{R}) koefisien tahanan dapat dilihat pada Tabel 5.6, dan Grafik 5.5 prosentase reduksi (\check{R}) dirumuskan sebagai berikut :

$$\check{R} = \frac{Cdn - Cdo}{Cdo} \times 100\%$$

Keterangan :

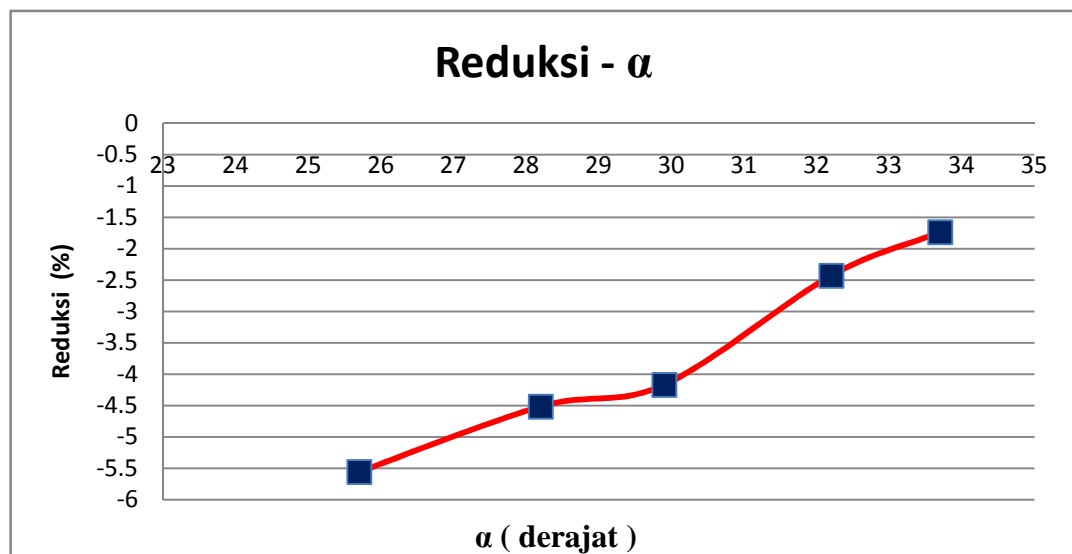
\check{R} = Reduksi koefisien drag (%)

Cdn = koefisien tahanan mobil model 1, 2, 3...

Cdo = koefisien tahanan mobil acuan

Tabel 5.6 Reduksi koefisien tahanan (\check{R})

No.	Jenis Mobil	α^0	Cd	\check{R} %
1.	Model 1	33.7	0.283	-1.736
2.	Model 2	32.2	0.281	-2.430
3.	Model 3	29.9	0.276	-4.167
4.	Model 4	28.2	0.275	-4.513
5.	Model 5	25.7	0.272	-5.556



Gambar 5.5 Grafik hubungan sudut kaca belakang (α) dengan reduksi koefisien tahanan (\check{R})

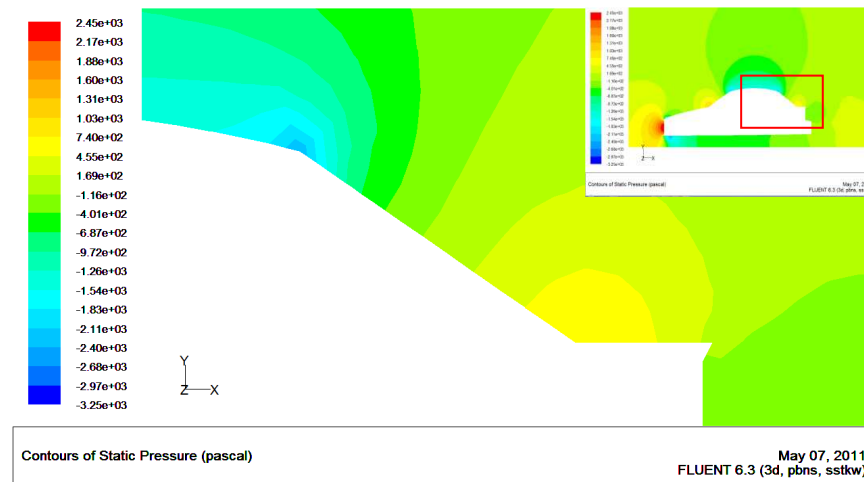
Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin kecil sudut kaca belakang mobil (α) maka semakin besar prosentase reduksi (\check{R}) koefisien tahanan yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena adanya penundaan titik separasi pada bagian kaca belakang mobil akibat dari pengecilan sudut kaca belakang mobil sehingga area yang terjadi pusaran menjadi lebih kecil maka nilai koefisien tahanan menjadi semakin kecil.

5.4.1 Analisa Hasil Simulasi Variasi Sudut Kaca Belakang Mobil

Hasil simulasi yang telah dilakukan untuk variasi sudut kaca belakang mobil ditampilkan dengan pola sebagai berikut :

5.4.1.1 Analisa Hasil Simulasi Berdasarkan Kontur Tekanan

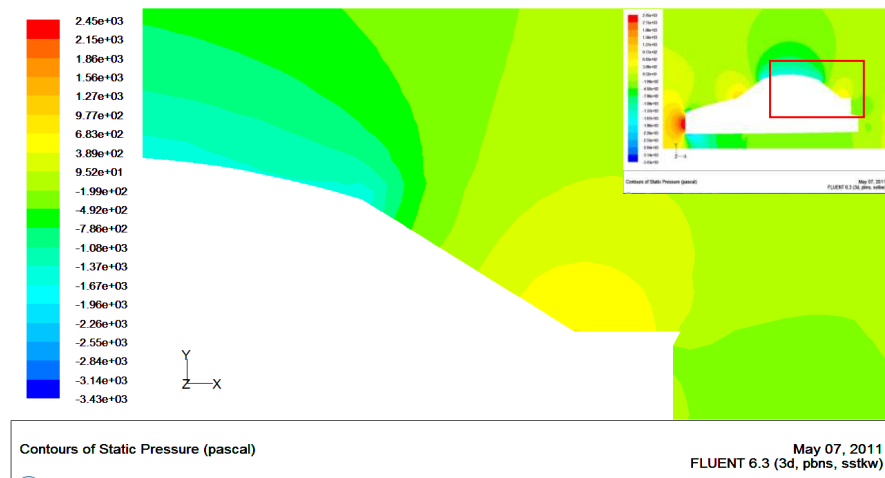
1) Mobil Model Acuan ($\alpha = 35.8^\circ$)



Gambar 5.6 Kontur distribusi tekanan pada mobil model acuan ($\alpha = 35.8^\circ$)

Dari gambar 5.6 terlihat bahwa distribusi tekanan pada permukaan bagian kaca belakang mobil dan permukaan depan mobil memiliki selisih nilai distribusi tekanan yang besar sehingga nilai koefisien tahanan menjadi besar. Besarnya distribusi tekanan pada bagian belakang mobil dianggap tetap karena dalam kasus ini tidak ada perubahan bentuk pada bagian depan mobil. Dengan perubahan sudut kaca belakang mobil diharapkan terjadi penambahan distribusi tekanan pada bagian belakang mobil sehingga selisih distribusi tekanan antara bagian depan dan belakang mobil menjadi semakin kecil maka nilai koefisien tahanan menjadi semakin kecil.

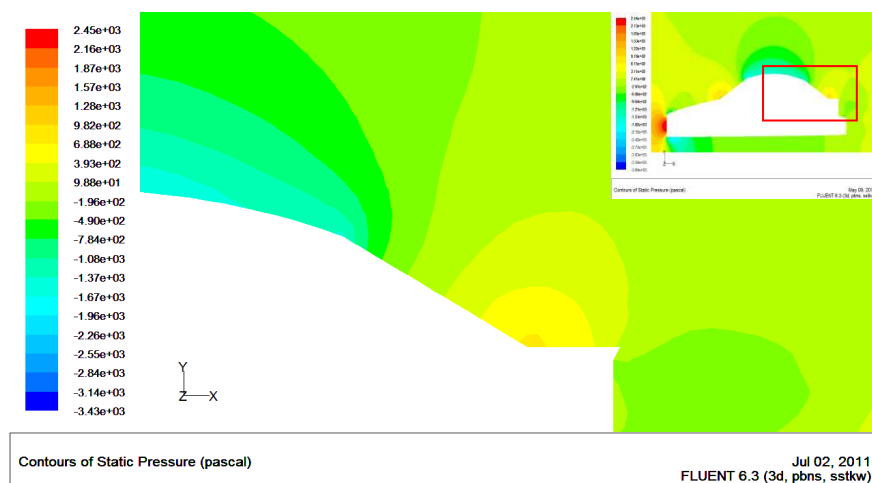
2) Mobil Model 1 ($\alpha = 33.7^\circ$)



Gambar 5.7 Kontur distribusi tekanan pada mobil model 1 ($\alpha = 33.7^\circ$)

Gambar 5.7 memperlihatkan distribusi tekanan pada kaca belakang mobil dengan sudut $\alpha = 33.7^\circ$ menjadi lebih besar pada bagian permukaan bagasi atas dan pada sudut bawah kaca belakang sehingga selisih distribusi tekanan antara tekanan pada bagian depan dan bagian belakang mobil menjadi semakin kecil, maka terjadi reduksi nilai keefisien tahanan.

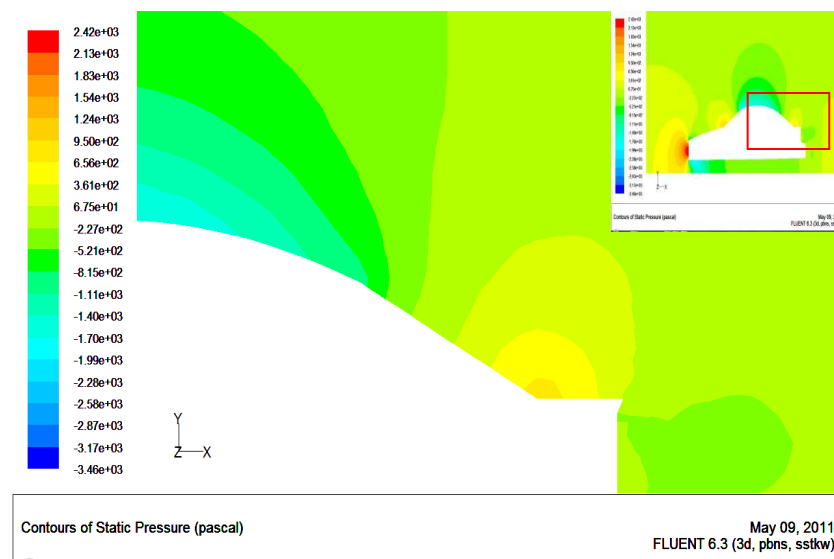
3) Mobil Model 2 ($\alpha = 32.2^\circ$)



Gambar 5.8 Kontur distribusi tekanan pada mobil model 2 ($\alpha = 32.2^\circ$)

Pada model mobil 2 ($\alpha = 32.2^\circ$) terlihat jelas pada gambar 5.8 distribusi tekanan pada permukaan kaca belakang mobil dan bagian atas bagasi menunjukkan nilai yang bertambah besar dibandingkan mobil model 1 sehingga selisih distribusi tekanan menjadi lebih kecil dan koefisien tahanan yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

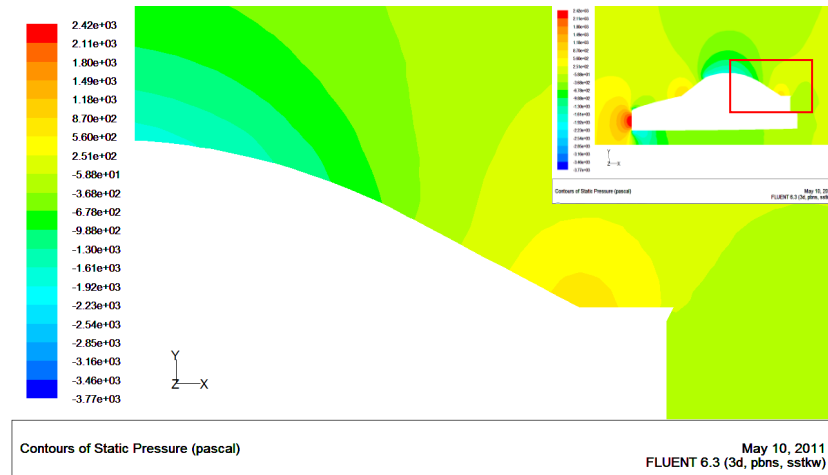
4) Mobil Model 3 ($\alpha = 29.9^\circ$)



Gambar 5.9 Kontur distribusi tekanan pada mobil model 3 ($\alpha = 29.9^\circ$)

Terlihat pada gambar 5.9 bahwa pada model mobil 3 ($\alpha = 29.9^\circ$) distribusi tekanan pada kaca belakang mobil menjadi lebih luas dari pada distribusi tekanan pada mobil model 2, terutama pada bagian atap mobil dan disekitar kaca belakang mobil. Apabila kita amati secara detail pada bagian depan mobil mengalami penurunan distribusi tekanan sehingga selisih distribusi tekanan antara bagian depan dan belakang mobil menjadi berkurang. Konsekuensinya akan dihasilkan koefisien tahanan yang menjadi lebih kecil.

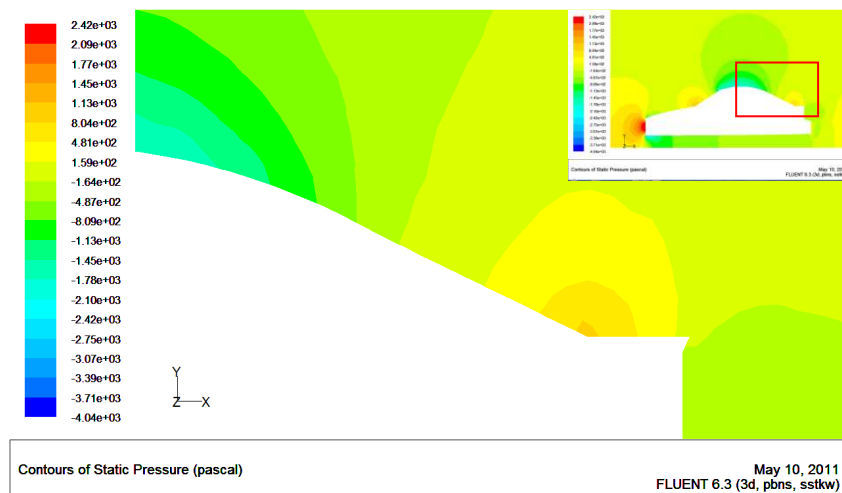
5) Mobil Model 4 ($\alpha = 28.2^\circ$)



Gambar 5.10 Kontur distribusi tekanan pada mobil model 4 ($\alpha = 28.2^\circ$)

Dari gambar 5.10 terlihat bahwa distribusi tekanan pada bagian atas bagasi mobil dan kaca belakang menjadi bertambah besar karena sudut kaca belakang mobil semakin kecil dan permukaan antara kaca belakang dan atap mobil semakin landai sehingga terjadi penambahan tekanan pada permukaan atas bagasi dan kaca belakang. Dengan mengasumsikan besarnya distribusi tekanan pada bagian belakang mobil tetap maka selisih distribusi tekanan anatara bagian depan dan belakang mobil menjadi berkirang maka nilai koefisien tahanan menjadi semakin kecil pula.

6) Mobil Model 5 ($\alpha = 25.7^\circ$)

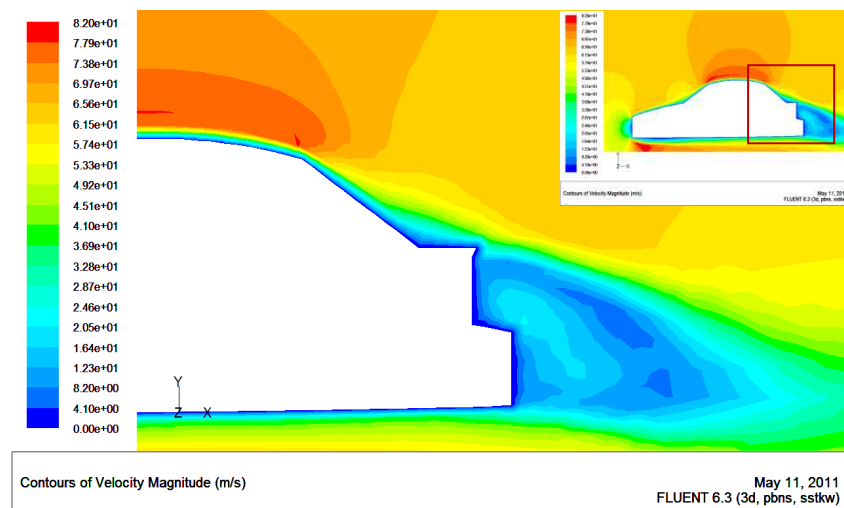


Gambar 5.11 Kontur distribusi tekanan pada mobil model 5 ($\alpha = 25.7^\circ$)

Pada gambar 5.11 terlihat bahwa distribusi tekanan di bagian kaca belakang mobil dan bagian atas bagasi mobil menjadi semakin besar bila dibandingkan dengan model mobil sebelumnya pada gambar 5.10. Semakin besar distribusi tekanan pada bagian belakang mobil maka dihasilkan selisih distribusi tekanan antara bagian depan dan belakang mobil yang lebih kecil sehingga pada model mobil 5 menghasilkan selisih distribusi tekanan yang paling kecil diantara model mobil yang lainnya. Dengan demikian nilai koefisien tahanan pada model mobil 5 menjadi lebih kecil dari pada model mobil sebelumnya.

5.4.1.2 Analisa Hasil Simulasi Berdasarkan Kontur Kecepatan

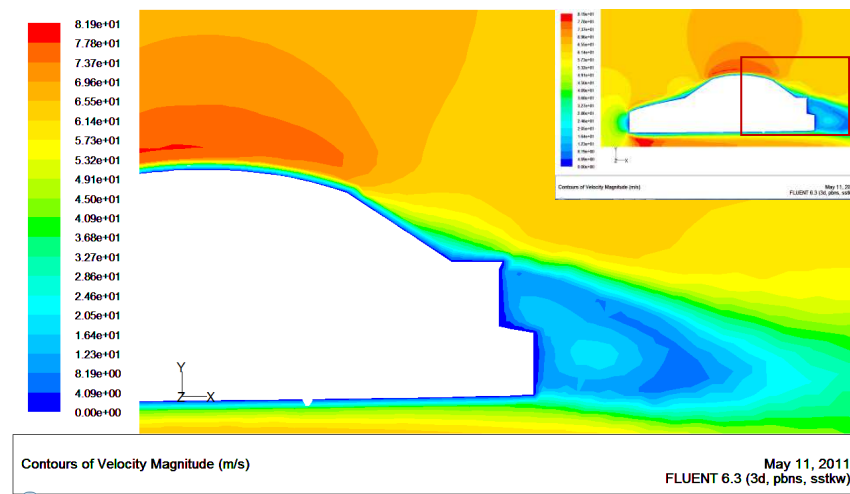
1) Mobil Model Acuan ($\alpha = 35.8^\circ$)



Gambar 5.12 Kontur kecepatan pada mobil model acuan ($\alpha = 35.8^\circ$)

Terlihat pada gambar 5.12 aliran udara yang melintasi bagian belakang *body* mobil terjadi separasi aliran yang diakibatkan efek gradien tekanan yang negatif pada permukaan kaca belakang mobil sehingga mengakibatkan aliran balik (*back flow*) dan memicu terjadinya olakan (*vortex*). Dalam keadaan ini koefisien tahanan lebih didominasi oleh efek tekanan (*pressure drag*) dari pada efek viskos.

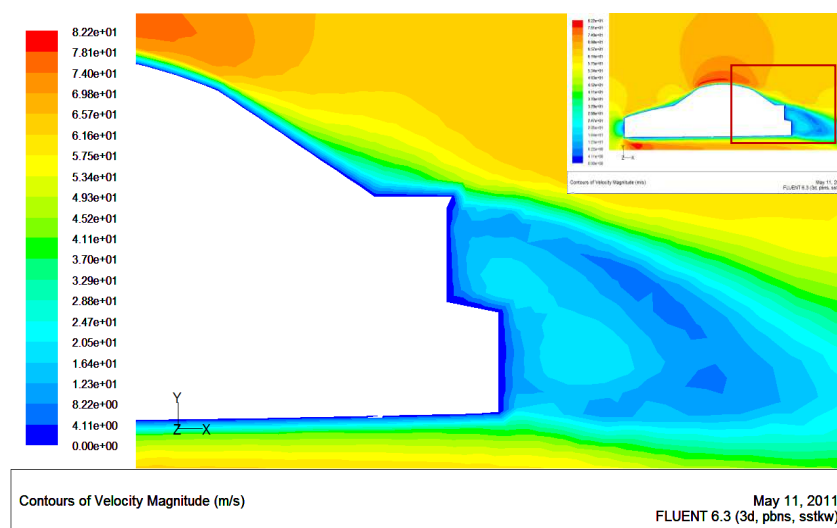
2) Mobil Model 1 ($\alpha = 33.7^\circ$)



Gambar 5.13 Kontur kecepatan pada mobil model 1 ($\alpha = 33.7^\circ$)

Dari gambar 5.13 terlihat pada kaca belakang mobil sudah terjadi separasi tetapi aliran masih dalam keadaan laminar (*laminar separation bubble*). Sudut kaca belakang mobil yang semakin kecil maka dihasilkan area separasi yang semakin kecil. Dan ini berdampak pula pada penurunan *drag* yang disebabkan oleh pengecilan area separasi.

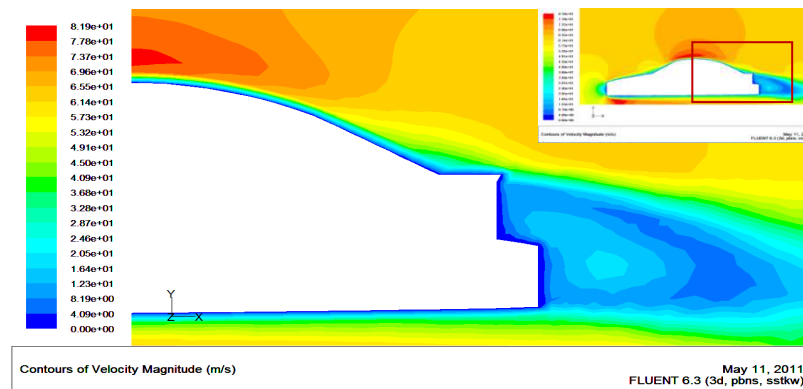
3) Mobil Model 2 ($\alpha = 32.2^\circ$)



Gambar 5.14 Kontur kecepatan pada mobil model 2 ($\alpha = 32.2^\circ$)

Pada gambar 5.14 kontur kecepatan pada mobil model 2 ($\alpha = 32.2^\circ$) tampak semakin berkurang pada bagian kaca belakang mobil sehingga mengakibatkan tekanan pada bagian belakang mobil menjadi lebih besar. Dan hal ini berdampak pula pada penurunan nilai koefisien tahanan yang disebabkan semakin kecil gradien tekanannya.

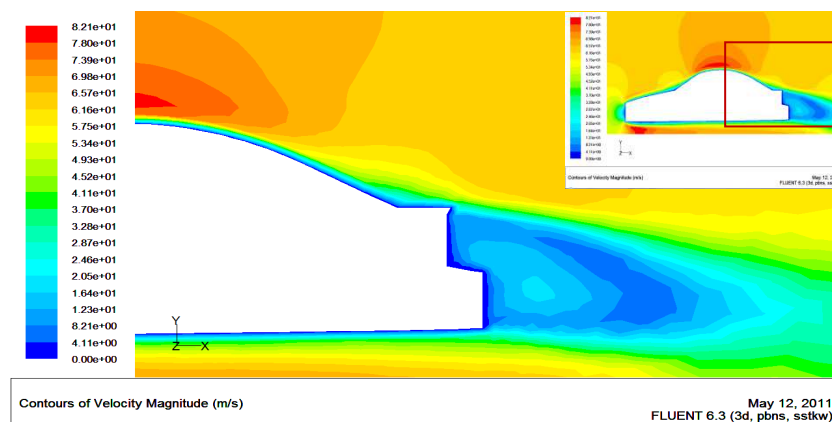
4) Mobil Model 3 ($\alpha = 29.9^\circ$)



Gambar 5.15 Kontur kecepatan pada mobil model 3 ($\alpha = 29.9^\circ$)

Gambar 5.15 memperlihatkan kontur kecepatan pada kaca belakang mobil dengan sudut $\alpha = 29.9^\circ$ menjadi semakin kecil sehingga area separasi menjadi semakin kecil pula. Pada bagian belakang mobil juga tampak area olakan (*vortex*) menjadi semakin kecil.

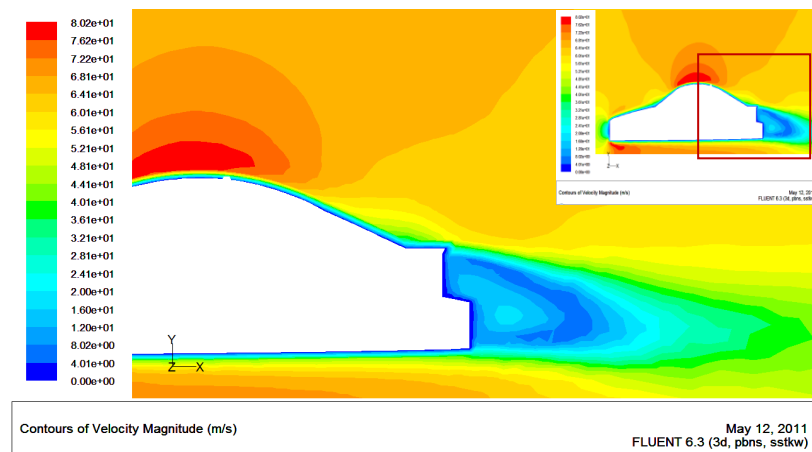
5) Mobil Model 4 ($\alpha = 28.2^\circ$)



Gambar 5.16 Kontur kecepatan pada mobil model 4 ($\alpha = 28.2^\circ$)

Pada model mobil 4 ($\alpha = 28.2^\circ$) terlihat pada gambar 5.16 bagian kaca belakang mobil dan atap mobil menjadi lebih landai dan *streamline* sehingga terjadi penundaan separasi aliran pada kaca belakang mobil. Konsekuensinya akan dihasilkan area olakan (*vortex*) yang lebih kecil. Dari gambar tersebut tampak pula kontur kecepatan pada bagian bawah kaca belakang dan bagian atas bagasi mobil menjadi semakin berkurang.

6) Mobil Model 5 ($\alpha = 28.2^\circ$)



Gambar 5.17 Kontur kecepatan pada mobil model 5 ($\alpha = 25.7^\circ$)

Dari gambar 5.17 tampak terjadi perubahan kecepatan pada bagian kaca belakang dan di atas bagasi mobil menjadi semakin lambat karena terjadi penundaan separasi yang mengakibatkan area olakan menjadi lebih kecil. Terlihat juga terjadi perubahan kontur kecepatan pada bagian belakang mobil yang menjadi semakin kecil.

Untuk mereduksi koefisien tahanan perlu dilakukan perubahan bentuk *body* mobil yang semakin *streamline* agar menghasilkan gradien tekanan yang lebih kecil sehingga nilai koefisien tahanan menjadi semakin kecil pula. Bentuk *body* belakang mobil yang semakin *streamline* juga berpengaruh terhadap nilai koefisien tahanan. Semakin *streamline* bentuk *body* belakang mobil maka akan menghasilkan area olakan (*vortex*) yang lebih kecil sehingga gradien tekanan menjadi lebih kecil maka nilai koefisien tahanan juga menjadi semakin kecil.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Dalam tugas akhir ini telah dilakukan simulasi terhadap model mobil sedan BMW 320i keluaran tahun 2010. Dari hasil simulasi, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Koefisien tahanan yang diperoleh dari hasil simulasi model mobil acuan adalah 0.288 sedangkan koefisien tahanan dari pabrikan 0.270 persentase *error* yang terjadi yaitu sebesar 1.80 %.
2. Semakin kecil sudut kaca belakang mobil maka semakin kecil nilai koefisien tahanan yang diperoleh.
3. Persentase reduksi koefisien tahanan terkecil adalah 1.736%, yaitu pada mobil model 1 dengan sudut kaca belakang 33.7° , sedangkan persentase reduksi koefisien tahanan terbesar adalah 5.556% yaitu pada mobil model 5 dengan sudut kaca belakang 25.7°
4. Untuk mereduksi koefisien tahanan perlu dilakukan perubahan bentuk *body* mobil yang semakin *streamline* agar menghasilkan gradien tekanan dan tegangan geser yang lebih kecil sehingga koefisien tahanan menjadi semakin kecil pula.

6.2. SARAN

Dari simulasi yang telah dilakukan dalam tugas akhir ini, terdapat beberapa hal yang mungkin menjadi masukan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Peningkatan *hardware* akan mendukung penggenerasian *mesh* menjadi lebih kecil, karena dengan ukuran *mesh* yang lebih kecil akan menurunkan nilai *error* hasil simulasi.
2. Pada tugas sarjana selanjutnya disarankan juga melakukan simulasi dengan variasi sudut kaca depan, memperhitungkan aliran di bawah bodi serta aliran disekitar *spion* mobil.

DAFTAR PUSTAKA

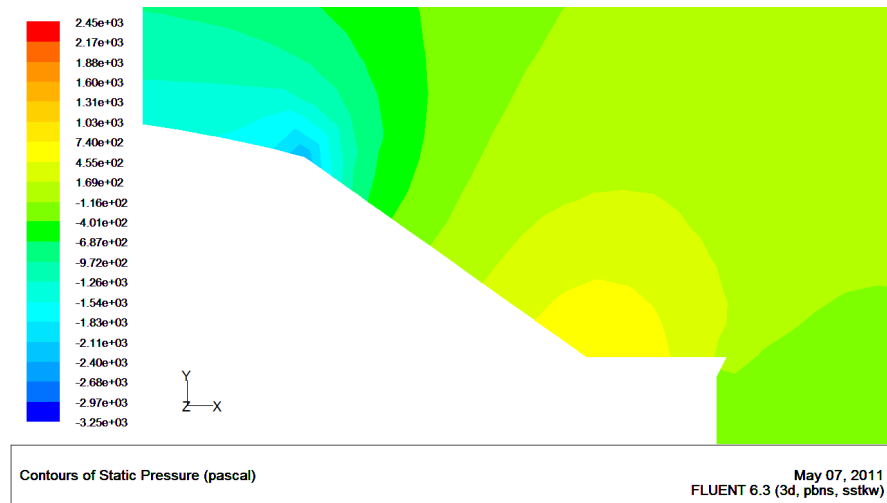
1. Desai, M., Channiwalla, S. A., and Nagarsheth, H. J., *Experimental and Computational Aerodynamic Investigations of a Car*, ISSN 1790-5087, Mechanical Engineering Department Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology (SVNIT), India, 2008
2. Damjanovi , D., Kozak, D., Ivandi , Ž., and Kokanovi , M., *Car Design As A New Conceptual Solution And CFD Analysis In Purpose Of Improving Aerodynamics*, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Mechanical Engineering Faculty in Slavonski, Croatia, 2010
3. Krajnovi , S., and Davidson, L., *Large-Eddy Simulation of the Flow Around Simplified Car Model*, SAE Paper No. 2004-01-0227, Detroit, USA, 2004
4. Nakashima, T., Tsubokura, M., Nouzawa, T., Nakamura T., Zhang, H., and Oshima, N., *Large-Eddy Simulation Of Unsteady Vehicle Aerodynamics And Flow Structures*, BBAA VI International Colloquium on : Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, Milano, Italy, July, 20-24 2008.
5. Sheikh Ahmad Zaki Sheikh Salim and Prof. Dr. Mat Nawi Wan Hassan , *Simulasi Aerodinamika Kendaraan Dengan Menggunakan Fluent*, Jurnal Teknikal Dan Kajian Sosial, Jilid 1, Malaysia, Juni 2003.
6. Gerhart, Philip M dan Richard J. Gross, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., USA, 1985.
7. Fox, Robert W dan Alan T. Mc Donald, *Introduction to Fluid Mechanics, fourth edition, SI Version*, John Wiley & Sons, Inc, Canada, 1994.
8. White, Frank M, *Fluid Mechanics*, Mc. Graw-Hill
9. www.google.com/image/eksperiment car wind tunnel
10. www.google.com/image/aerodinamika force car CFD FLUENT
11. www.wikipedia.com/image/auto mobile drag coefficient
12. FLUENT, Inc, *Manual FLUENT Documentation*, FLUENT, Inc, 1999.
13. Tuakia, Firman, *Dasar-dasar CFD Menggunakan FLUENT*, Informatika, Bandung, 2008.

14. Zuhri, Mustofa, *Analisa Desain Aerodinamika Mobil Sedan Dengan Menggunakan Program Komputasi Dinamika Fluida*, Teknik Mesin Universitas Diponegoro, Semarang, 2009
15. [www.google.com/image/drag coefficient of wedges and cones](http://www.google.com/image/drag+coefficient+of+wedges+and+cones)

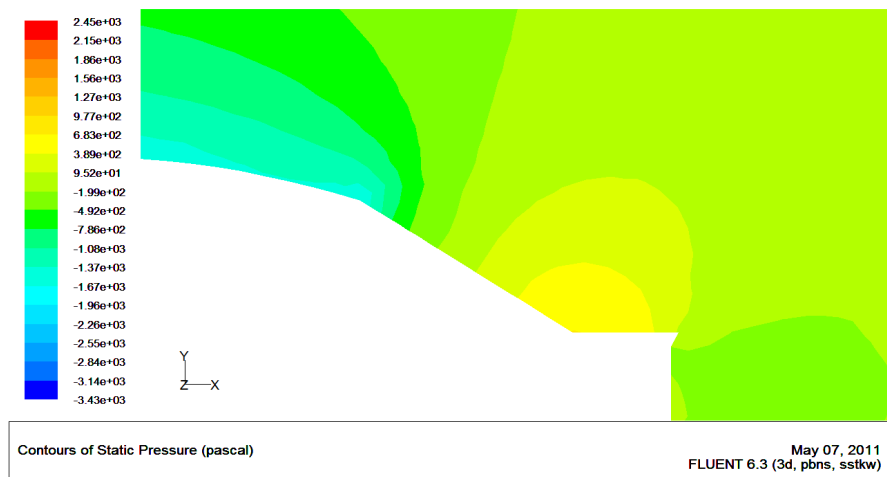
Lampiran A

Contours of Static Pressure

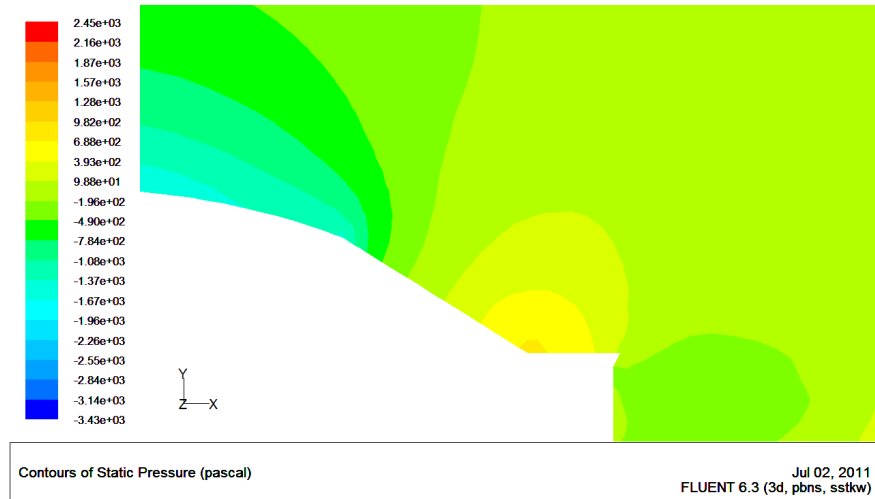
(Variasi Model Mobil)



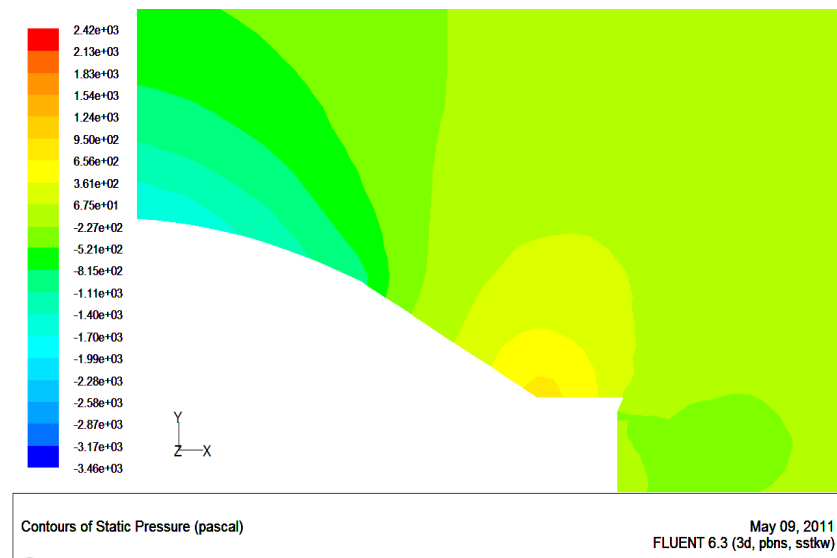
Gambar A-1 Mobil model acuan



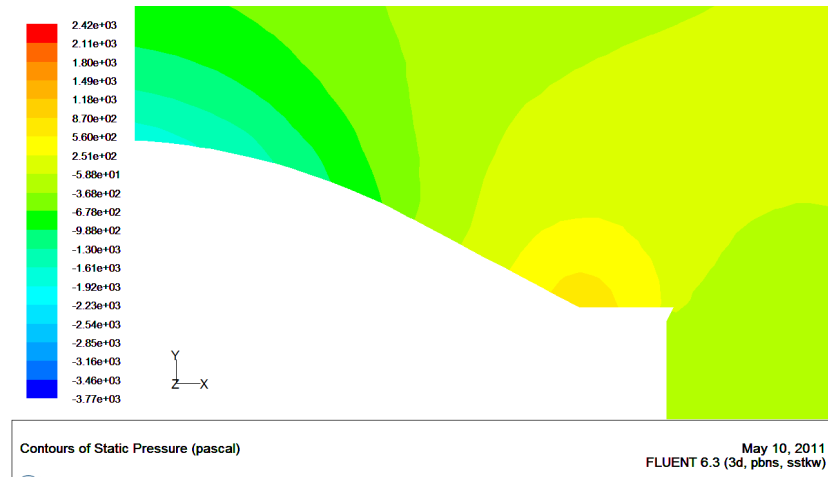
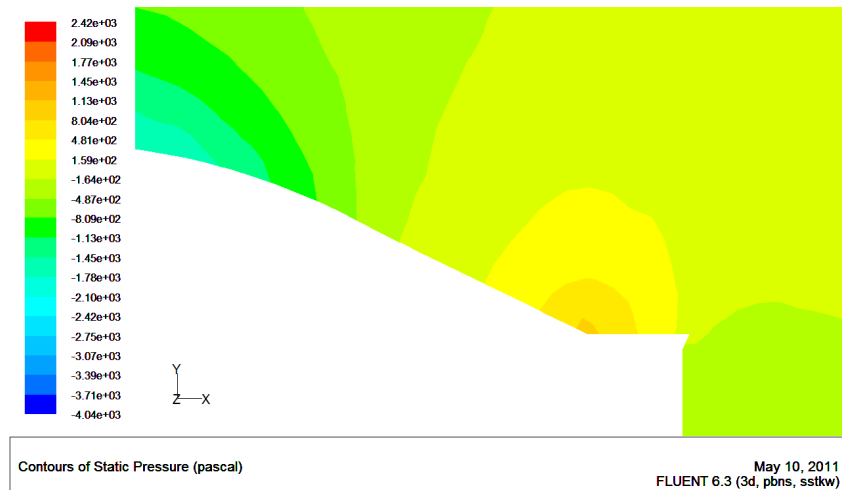
Gambar A-2 Mobil model 1



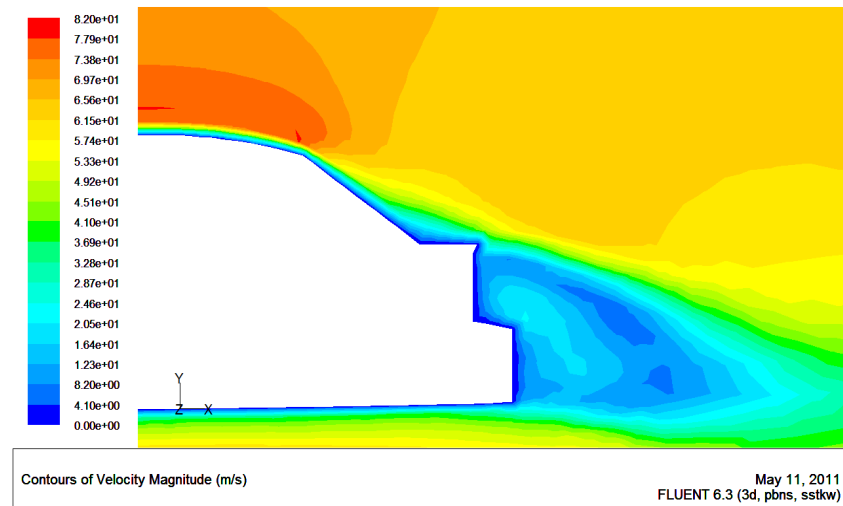
Gambar A-3 Mobil model 2



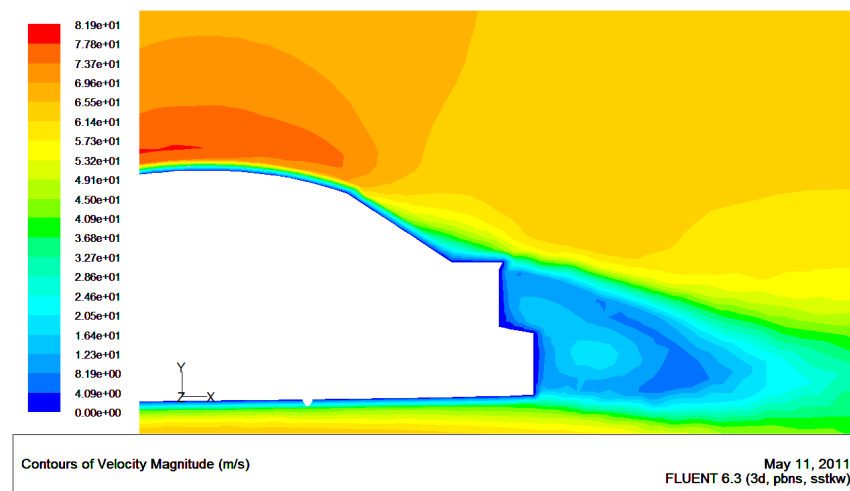
Gambar A-4 Mobil model 3

**Gambar A-5** Mobil model 4**Gambar A-6** Mobil model 5

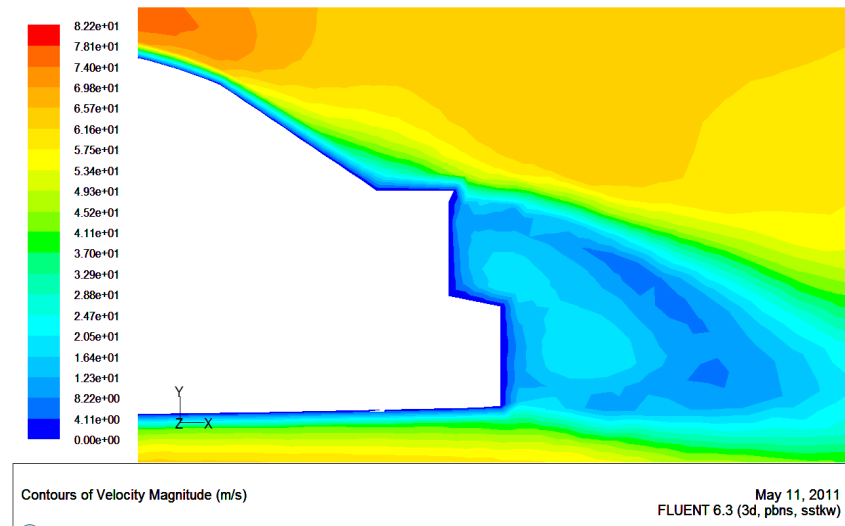
Lampiran B
Contour of Velocity Magnitude
(Variasi Model Mobil)



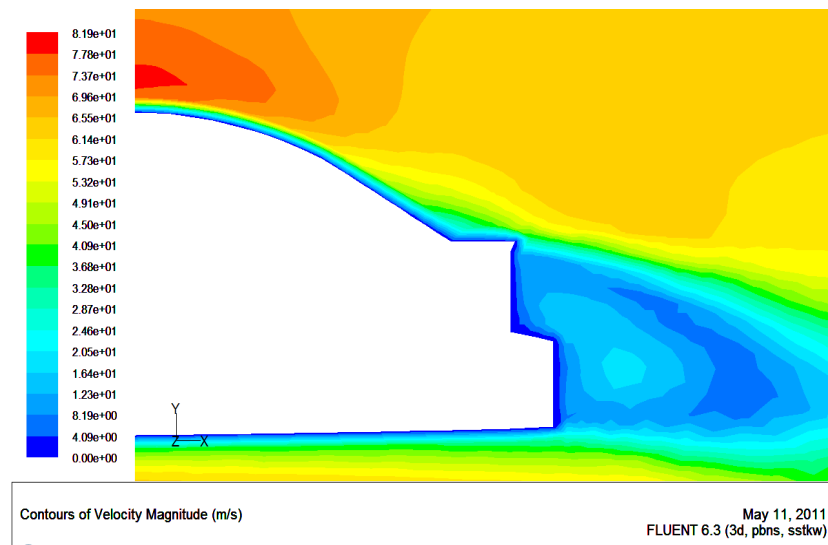
Gambar B-1 Mobil model acuan



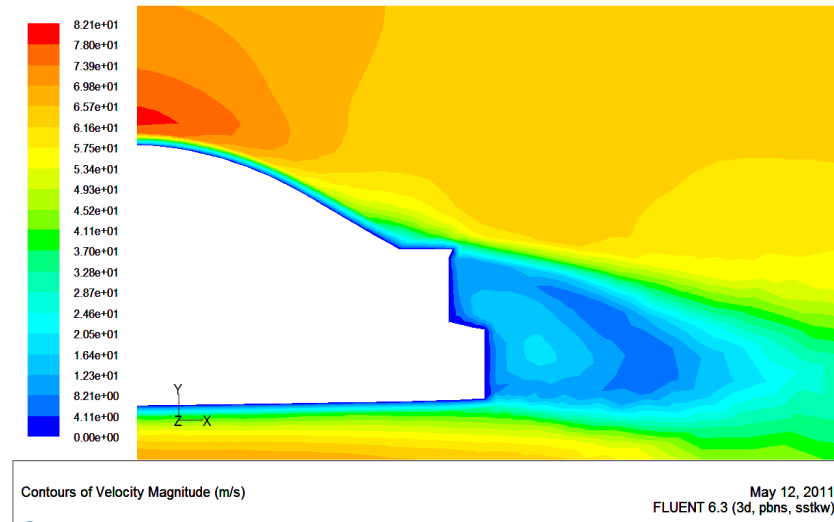
Gambar B-2 Mobil model 1



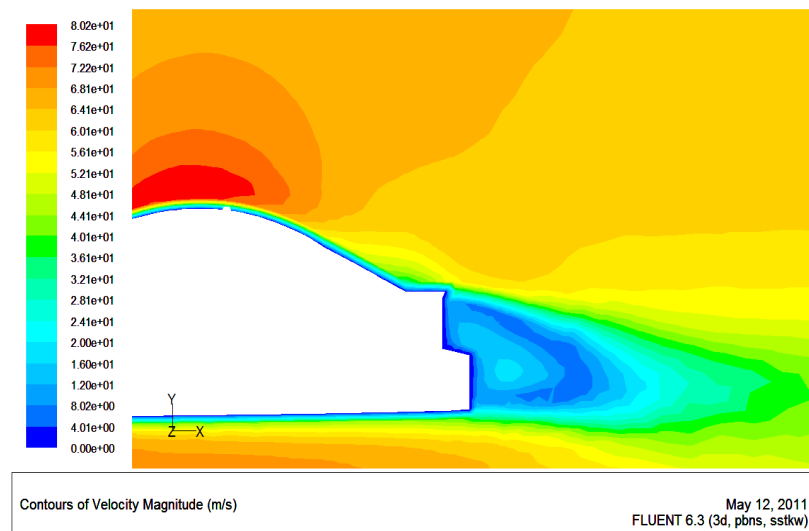
Gambar B-3 Mobil model 2



Gambar B-4 Mobil model 3



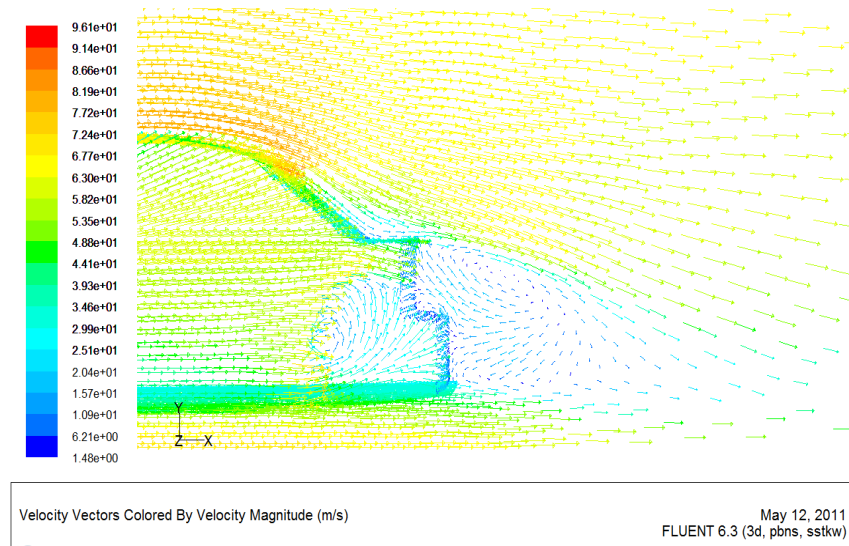
Gambar B-5 Mobil model 4



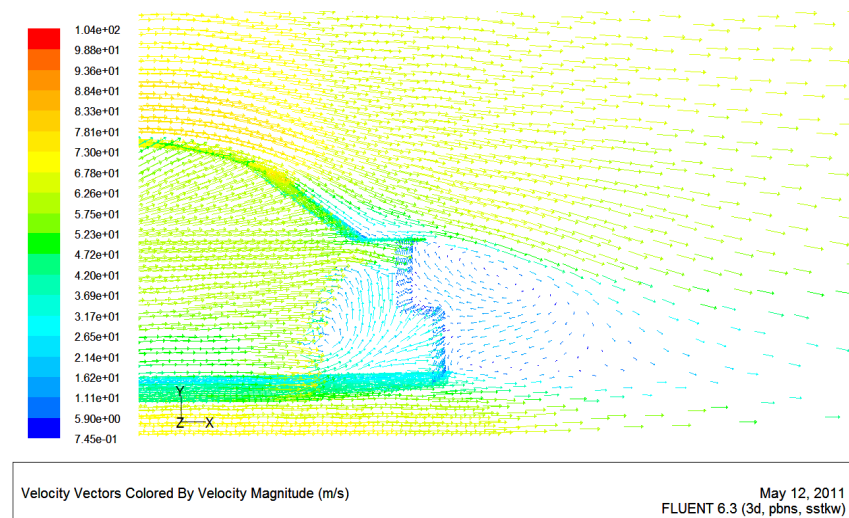
Gambar B-6 Mobil model 4

Lampiran C

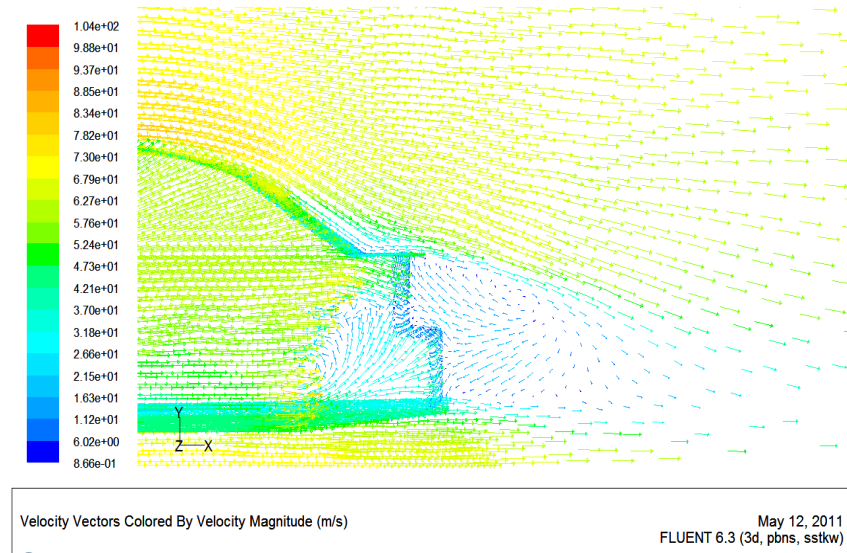
Velocity Vectors by Velocity Magnitude (Variasi Model Mobil)



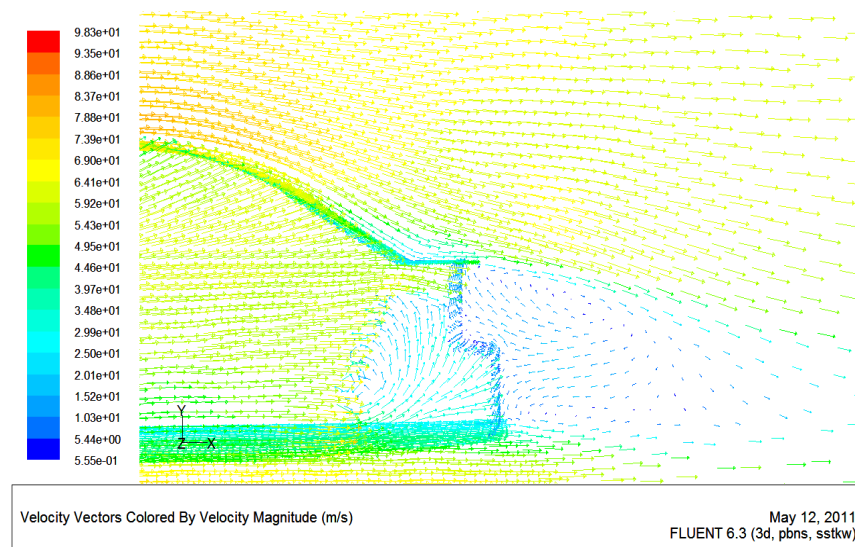
Gambar C-1 Mobil model acuan



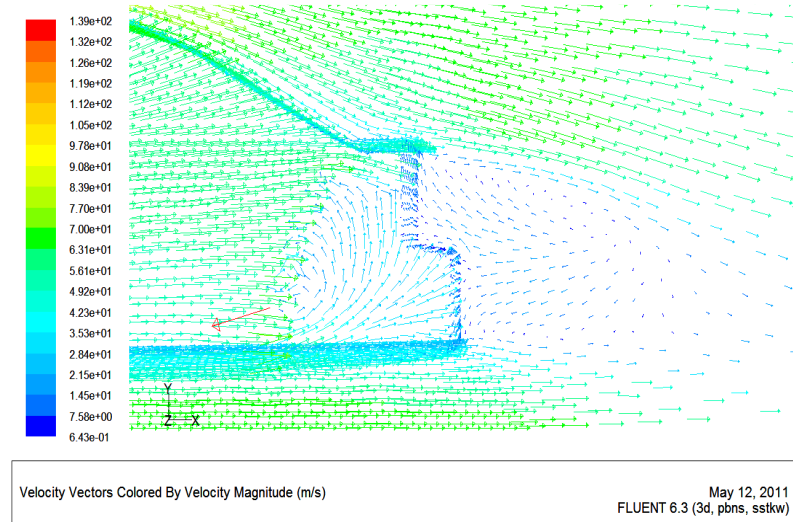
Gambar C-2 Mobil model 1



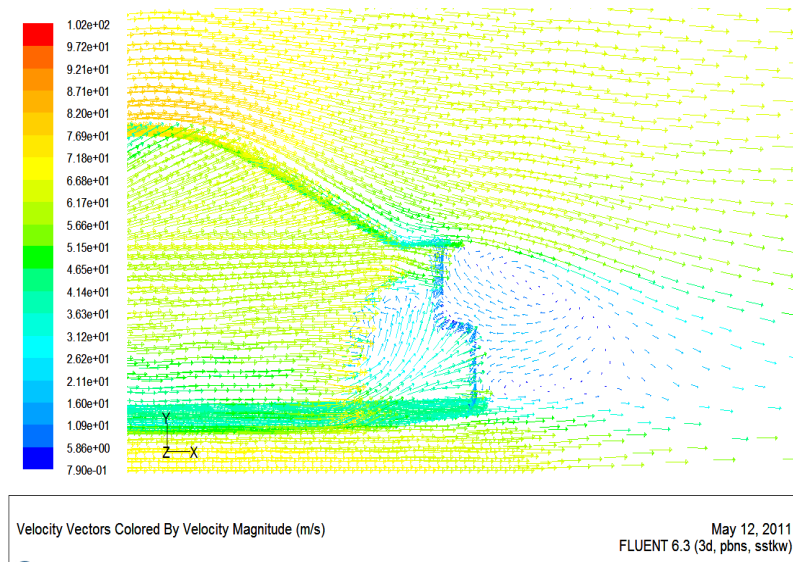
Gambar C-3 Mobil model 2



Gambar C-4 Mobil model 3



Gambar C-5 Mobil model 4

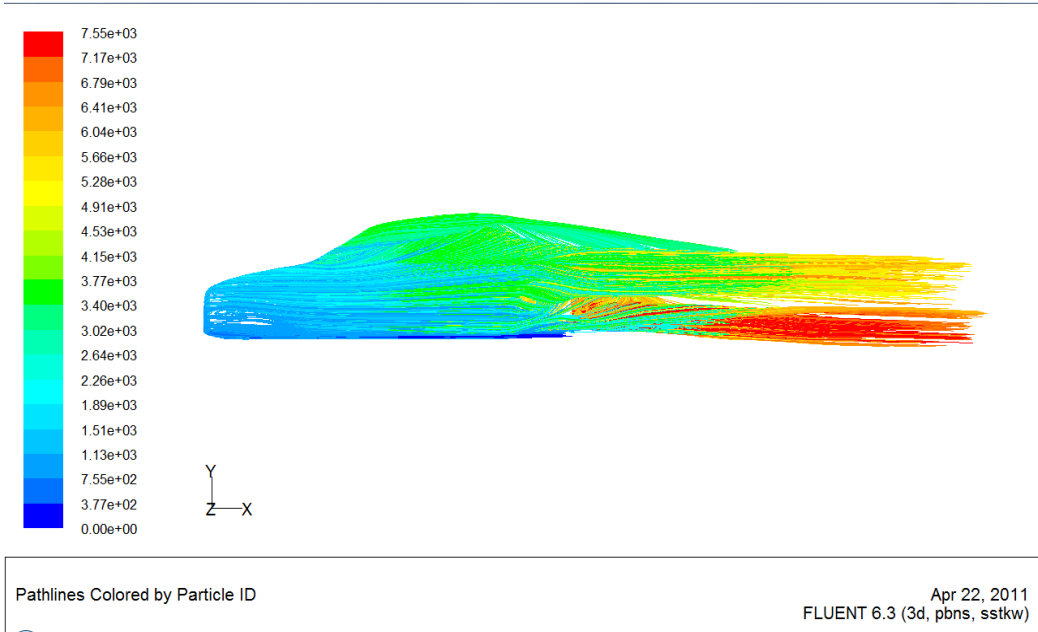


Gambar C-6 Mobil model 5

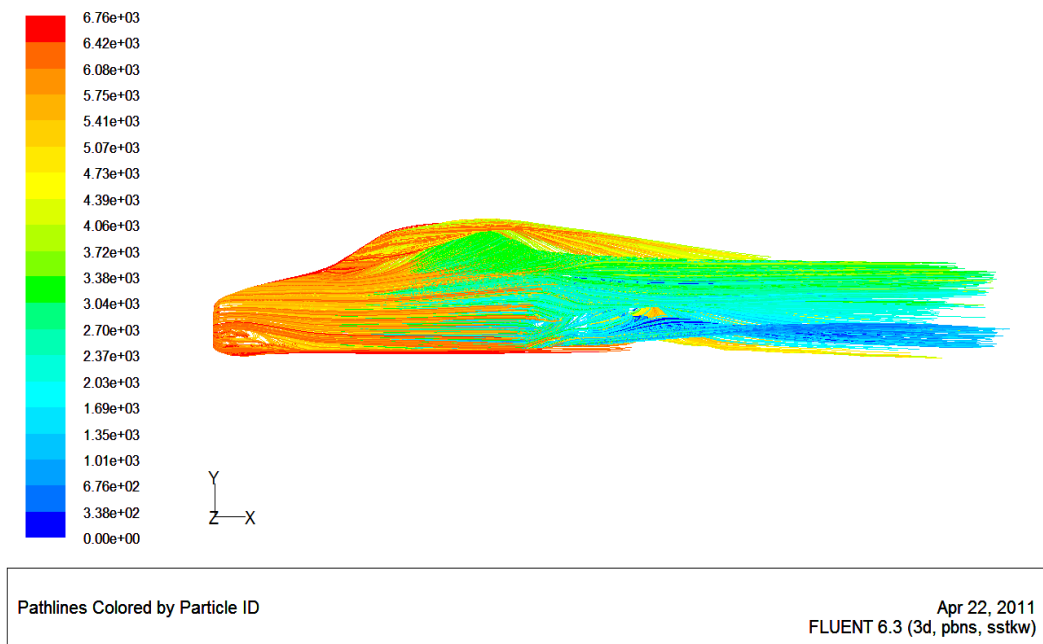
Lampiran D

Path Lines by Particle ID

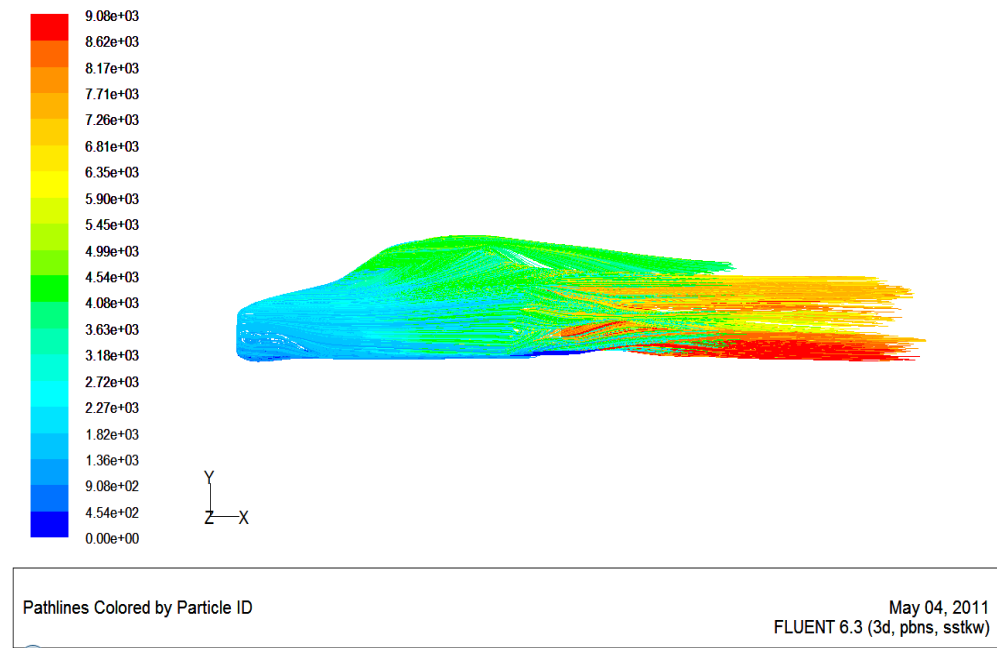
(Variasi Model Mobil)



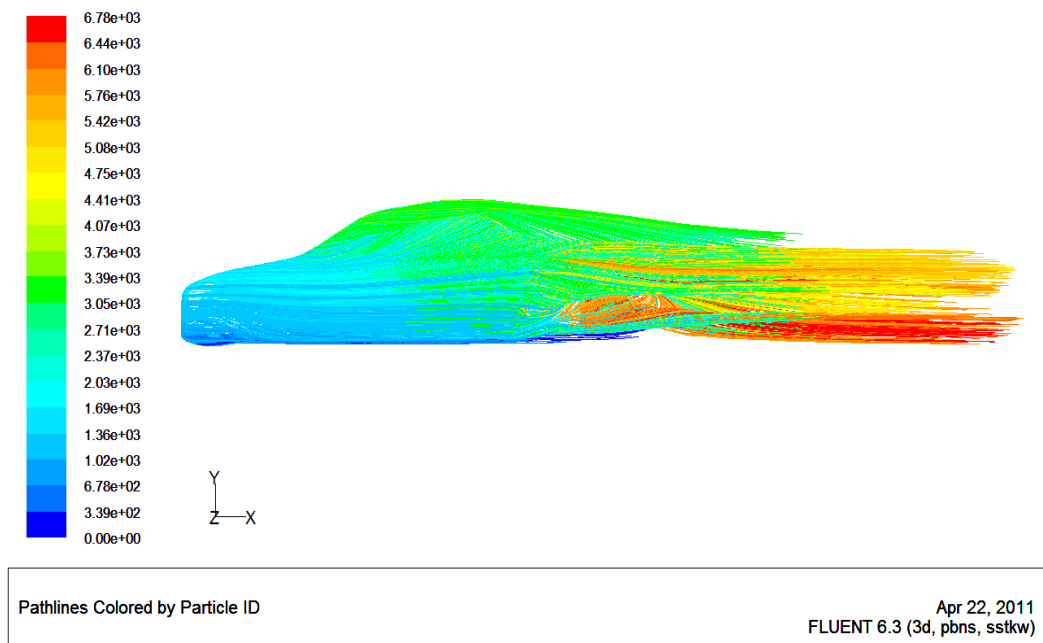
Gambar D-1 Mobil model acuan



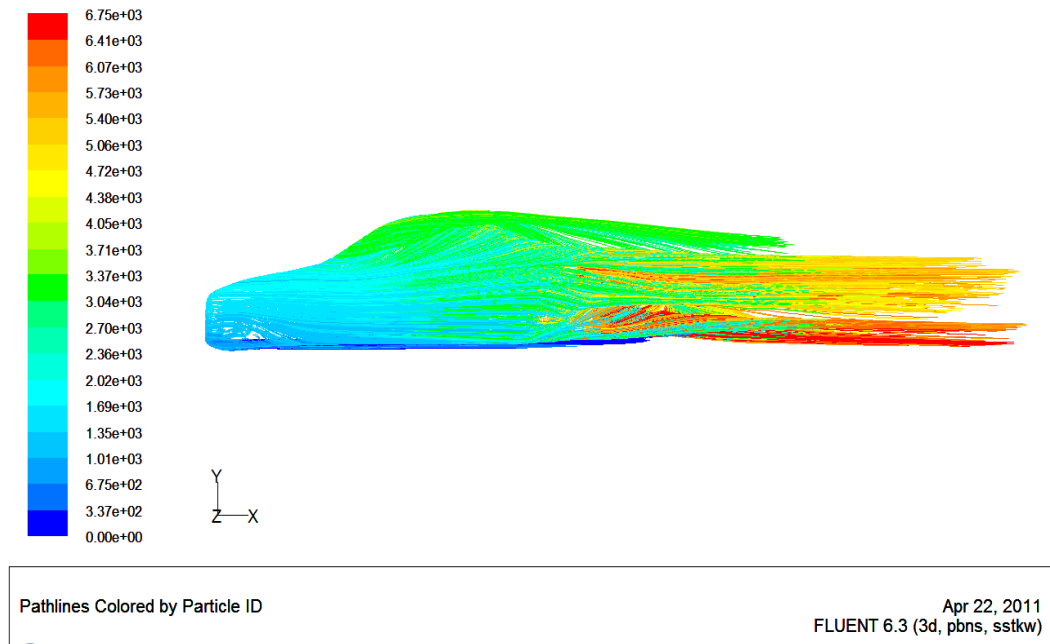
Gambar D-2 Mobil model 1



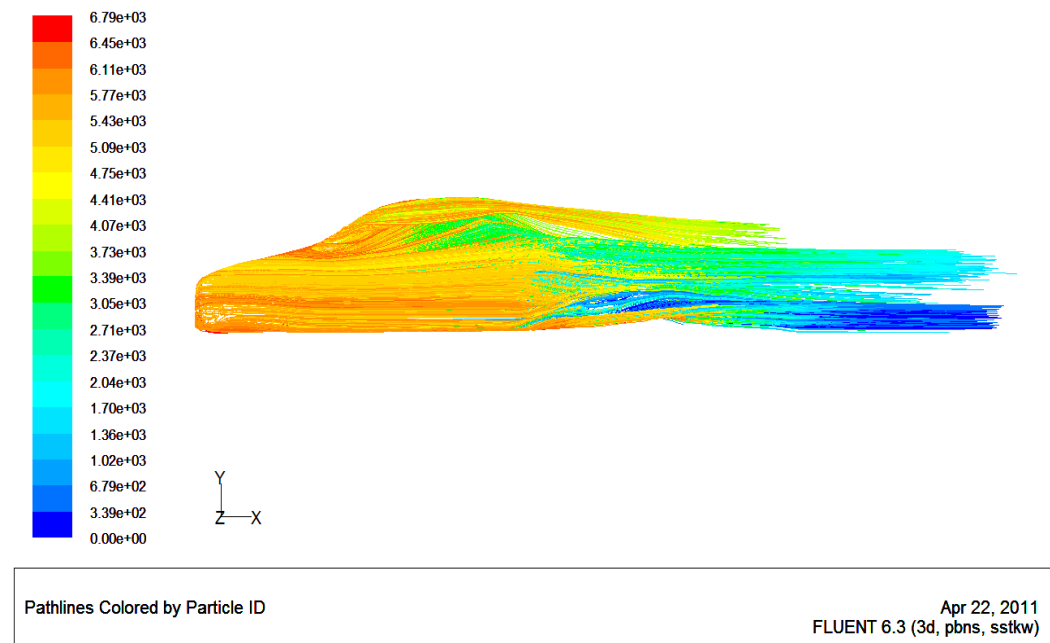
Gambar D-3 Mobil model 2



Gambar D-4 Mobil model 3



Gambar D-5 Mobil model 4



Gambar D-6 Mobil model 5